MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022112203

石墨烯/硅基异质集成光电子器件

彭文怡，严思琦*，唐　明

（华中科技大学 光学与电子信息学院，武汉 430074）

摘　要： 石墨烯/硅基异质集成的光子器件研究在近年来取得了巨大进展，因石墨烯所具有的诸多独特的物理性质如超高载流子迁移率、超高非线性系数等，石墨烯/硅基异质集成器件展现出了诸如超大带宽、超低功耗等优异性能。文章介绍了近年来报道的典型石墨烯/硅基异质集成器件，包括石墨烯/硅基电光调制器、石墨烯/硅基热光调制器和石墨烯/硅基光电探测器，简要阐述了其原理与性能，并对其未来的应用与发展做出了展望。

关键词： 硅基异质集成光子器件；石墨烯；调制器；探测器

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1020－09

Integrated Optoelectronic Devices Based on the Hybrid Integration of Silicon and Graphene

PENG Wenyi，YAN Siqi，TANG Ming

（School of Optical and Electronic Information，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，CHN）

Abstract： The research on graphene/silicon-based hetero-integrated photonic devices has made great progress in recent years. The graphene/silicon-based heterogeneous integrated devices have shown excellent performance such as ultra-large bandwidth and ultra-low power consumption thanks to the unique physical properties of graphene，such as ultra-high carrier mobility and ultra-high nonlinear coefficient. In this work，we reviewed the typical graphene/silicon-based heterogeneous integrated devices reported in recent years，including graphene/silicon-based electro-optical modulators，graphene/silicon-based thermo-optical modulators and graphene/silicon-based photodetectors，briefly described their principles and properties，and made a prospect for their future applications and development.

Key words： silicon-based integrated photonic device；graphene；modulator；photodetector

0　引言

硅基光子技术因其所具有的高集成度、低损耗、低成本以及与 CMOS 工艺兼容的突出优势，被认为是实现大规模光子集成回路最有前途的技术之一[1-2]，在光通信、光计算等领域已经得到了广泛的应用[3]。然而，通信容量爆炸式增长，对于硅基器件的带宽、功耗等性能的要求不断提高[4]，传统的硅基光电子器件面临着巨大的技术挑战[5]。由于硅材料的载流子速率较低，非线性效应相对较弱，仅依靠硅材料已难以满足未来光电器件对性能的严苛需求。因此，在硅基平台中引入具有优异性能的材料进行异质集成已势在必行。石墨烯是一类由碳原子以六边形组成的单原子层，具有优异的电学和光学特性，如极高的载流子迁移率、高导热性、高非线性系数等，这些性质能够有效弥补硅材料载流子迁移速率低、非线性效应弱[6]等缺陷，从而有效提高硅基光电器件性能。因此，石墨烯已经与硅基光电器件广泛融合[7-9]，为传统的硅基光电子领域带来了新机遇。

围绕石墨烯/硅基异质集成光电器件，本文将首先对石墨烯的光电性质做出简介，然后分别分析和讨论石墨烯/硅基热光调制器、石墨烯/硅基电光调制器和石墨烯/硅基光电探测器的基本原理和研究进展。最后，对石墨烯在硅基光电子器件领域的未

收稿日期：2022－11－22.

* 通信作者：严思琦　E-mail：siqya@hust.edu.cn

来发展前景进行了展望。

1　石墨烯的光电性能

长久以来，石墨烯因其特殊的二维结构，被认为难以在室温下稳定存在，直到 2004 年，英国曼彻斯特大学的科学家 Geim 和 Novoselov[10] 利用机械剥离法从石墨中分离出单层石墨烯，从而首次证实了石墨烯能在室温环境中稳定存在，两人也因“在二维石墨烯材料的开创性实验”，共同获得 2010 年诺贝尔物理学奖。而首次将石墨烯应用在电子器件领域则要追溯到 2007 年，Bunch 等[11] 将石墨烯材料应用于集成微机电谐振器，这是石墨烯在电子器件领域的应用开端。而在 2009 年，韩国的 Kim 等[12] 使用化学气相沉积法生长大面积的石墨烯，使得石墨烯的大规模生长和转移成为了可能，为石墨烯的广泛应用奠定了基础。

在光电子领域，石墨烯具有许多独特且优异的物理性质，典型的性质包括：(1)高载流子迁移率[13]。石墨烯在室温下载流子迁移率达 250 000 $cm^2/(V \cdot s)$，4 K 低温下更是高达 6 000 000 $cm^2/(V \cdot s)$，这使得基于石墨烯的光电调制器和探测器的理论带宽能够远高于传统的硅基调制器；(2)高导热性[14-15]。热导率高达 5 300 $W/(m \cdot K)$，约为铜的 10 倍，这使得基于石墨烯的热光调制器的加热速率与调制速率比传统的硅基调制器更高；(3)低光吸收率[16](高透明度)。在可见光到近红外波段，单层石墨烯吸收率为 2.3%，可以降低石墨烯器件的损耗；(4)高光损伤阈值，机械稳定性优异[17]。可用于导电薄膜的工业化生产如透明加热器、太阳电池等。

以上石墨烯的优秀特性与其特殊的晶格与能带结构[18] 紧密相关。石墨烯是由碳原子呈六角蜂窝状排列组成的单原子层状材料，碳原子之间以 sp^2 杂化形式成键，键长为 0.142 nm，晶体结构稳定，因此具有很高的力学强度和柔韧性。在亚微米尺度内，石墨烯中的载流子可以几乎不受晶格散射的影响，因此石墨烯具有高载流子迁移率，从而保证器件的响应速度。此外，相较于传统半导体，石墨烯是一种零带隙材料(导带和价带在 K 点处简并，如图 1)，因此不会受到带隙的束缚，可吸收光波长范围从紫外延伸至远红外，从理论上可实现超宽光谱的探测。这些良好的性质为石墨烯在硅基光电器件中的广泛应用奠定了坚实的理论基础。

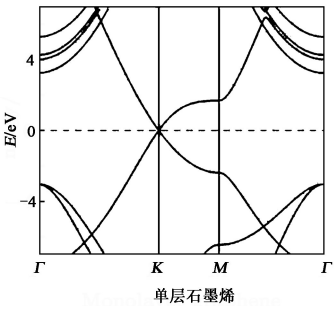


图 1　石墨烯的能带结构

2　石墨烯/硅基调制器

调制器是光通信和信息处理系统中重要的部件[19-20]，它通过外部输入电信号，对光信号的相位、振幅等信息进行调制，实现将电信号向光信号的加载。调制器按调制原理可分为热光调制和电光调制，热光调制器利用金属热电极产生的焦耳热改变波导材料的折射率，从而改变在其中传播的光信号相位，并结合干涉结构，最终实现强度调制[21]；电光调制器则基于材料的电光效应，通过外加电场改变材料折射率，从而实现对入射光相位、振幅等参数的调制。传统的硅基热光调制器通常调制速度较慢，而基于载流子色散效应的电光调制器虽然调制速度较快，但在相位调制过程中不可避免地会引入强度调制，从而对信号质量造成影响。基于石墨烯/硅异质集成的热光/电光调制器则有望突破传统硅基调制器的诸多性能瓶颈。下面将对石墨烯热光调制器和电光调制器原理和发展现状进行分析和介绍。

2.1　热光调制器

根据热光效应的原理，由热光效应引起的硅折射率的变化 Δn 可表示为

$$\Delta n = \left(\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}\right) \cdot \Delta T \tag{1}$$

其中，ΔT 代表温度的变化，通常由硅波导上的金属微加热器引入[22]。为了避免金属对光信号的强烈吸收所引入的额外损耗，通常需要在硅波导和金属加热器之间引入厚度约为 2 μm 的 SiO_2 层，但 SiO_2 的导热系数低(0.27 $W/(cm \cdot K)$)，阻碍了热量的传递，从而导致传统硅基热光调制器的响应速度通常较慢，在几十微秒量级，功耗较高，实现 2π 相移的功耗约为几十毫瓦[23-25]。

考虑到石墨烯所具有的超高热导率以及较低的光吸收系数，研究人员提出了将石墨烯作为加热器的材料与硅波导集成的方案。石墨烯对光的低吸收

系数使其能够与硅波导紧密接触，避免了传统硅基热光调制器中的氧化层导致的热量损失，从而显著提高调谐效率。此外，由于石墨烯高达 5 300 W/(m·K)热导率，所以其响应时间可以大幅减少。2011 年，Kang 设计了一种高性能、柔性、透明的加热器[26]，是首次报道的石墨烯加热器。在该结构中，将化学气相沉积合成的大面积石墨烯薄膜作为加热器，实现了较高加热速率和均匀的温度分布，且其 3 dB 带宽为 1.2 GHz。而石墨烯首次被直接应用到热光调制器领域则可追溯到 2013 年，来自韩国的研究人员展示了一种基于石墨烯等离子体波导的石墨烯/硅基热光调制器[12]，如图 2(a)。在本结构中，石墨烯既作为波导，实现表面等离子体极化子的长距离传导，又作为加热材料调控，通过热诱导不均匀的折射率分布的效应，改变等离子体波导的传输损耗，最终实现上升和下降时间分别为 14.8 与 16.0 ms 的快速热光调制，而器件的尺寸仅为 1.5 mm×1 mm×0.64 mm。上述结构虽然首次实现了基于石墨烯/硅基的混合热光调制器，但其响应时间相比于传统硅基热光调制器并无显著提升。为进一步优化石墨烯/硅基热光调制器的响应时间和加热效率，研究人员通过将包括微环谐振器、微盘谐振器和光子晶体波导在内的特殊光学结构与石墨烯进行了异质集成，并取得了不俗的成果。如图 2(b)所示，Gan 等[27]在 2015 年报道了一种石墨烯/硅基微环异质集成结构，通过将石墨烯铺设在硅基微环谐振器上，并结合微环的

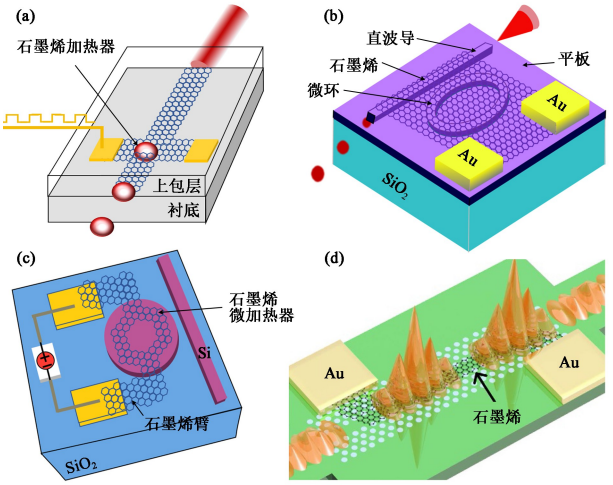


图 2 典型石墨烯/硅基热光调制器。(a)基于石墨烯等离子体波导的石墨烯热光调制器[26]；(b)石墨烯/硅基微环异质集成的热光调制器结构[27]；(c)石墨烯热电极与微盘谐振器异质集成热光调制器结构[28]；(d)慢光增强石墨烯微加热器示意图[29]

谐振特性，在 28 mW 的功率实现了具有 2.9 nm 的谐振波长漂移，消光比达到 7 dB，90%的上升和下降时间分别低至 750 和 800 ns，该响应速度相对于传统的硅基热光调制器有了显著提升，但由于石墨烯加热器完全覆盖了整个芯片而非仅覆盖光场区域，导致其加热的功耗仍然较高。

为了提升热光调制效率，浙江大学的 Yu 等[28]将石墨烯与硅基微盘谐振器进行了异质集成，并通过对石墨烯热电极形状的设计，使其与谐振腔光场的重叠程度大幅度增加，避免了热量的损失，从而显著提升了加热效率，其具体结构如图 2(c)所示。该结构的热调谐效率高达 1.67 nm/mW，热调谐的 90%上升时间和下降时间分别约为 12.8 和 8.8 μs，相比于传统的硅基热光调制器，该结构的加热效率与响应速度均得到了显著提升。

在上述工作的基础上，来自华中科技大学的研究人员与丹麦科技大学合作，提出了一种硅光子晶体波导与石墨烯加热器异质集成的方案[29]，借助光子晶体波导中慢光效应，显著促进光与石墨烯相互作用，来大幅度降低加热功耗，同时实现快速的热光调制。其结构如图 2(d)所示，石墨烯沉积在硅基光子晶体波导的核心区域，最大程度实现光与热的相互作用。该方案中使器件传输谱产生 2π 相移所需的功耗仅为 3.99 mW，上升和下降时间(10%～90%)仅为 750 和 525 ns，是已报道的石墨烯硅基热光调制器中性能最佳的方案。

从上文的分析可以看出，得益于石墨烯的超高热导率以及对硅光芯片结构的巧妙设计，石墨烯/硅基热光调制器展现出了比传统硅基热光调制器更显著的性能优势，具有更快的响应速度和更高的加热效率，有望未来在大规模硅基光电集成芯片和光学相控阵芯片等领域得到广泛应用。

2.2 电光调制器

由于硅材料不具有 Pockels 效应，传统的硅基电光调制器仅能利用等离子色散效应实现调制[30]。等离子色散效应是一种间接电光效应，它通过外加电场改变有源区自由载流子浓度，进而影响硅材料折射率的实部和虚部，从而调制输出光波的相位和幅值。但是由于受到硅材料载流子复合寿命的限制，在调制效率和速率上面临瓶颈，因此在具体应用上存在较大的局限性。

由于单层石墨烯的带间跃迁与电吸收特性较强烈[31]，使得石墨烯可作为光学电光调制器的有源部

分。相较于传统硅基电光调制器，基于石墨烯的硅基电光调制器有其独特的优点。首先，石墨烯中载流子迁移率非常高，使得石墨烯/硅基异质集成的调制器理论带宽超过 200 GHz；此外，石墨烯的光吸收与波长无关，覆盖了所有光通信波段以及中、远红外，这使得石墨烯调制器所支持的带宽范围可覆盖超过 1 μm；同时，石墨烯/硅基调制器还具有与 CMOS 兼容、热稳定性良好的优点。这些优异的光电性能是研制超高速、小尺寸、低驱动电压、宽光谱的石墨烯/硅基电光调制器的基础。

在石墨烯电光调制器中，电光调制[32]是通过外加电压调控石墨烯中载流子的浓度，从而控制石墨烯费米能级，进而改变石墨烯的带间和带内吸收率，引起石墨烯折射率的实部与虚部的变化，改变石墨烯/硅基异质集成波导中光场的有效折射率，最终实现相位调制和强度调制。在上述过程中，石墨烯的电导率与费米能级的具体关系如公式(2)所示[33]：

$$\sigma(\omega)=\frac{\sigma_0}{2}\left(\tanh\frac{\hbar\omega+2\mu}{4k_BT}+\tanh\frac{\hbar\omega-2\mu}{4k_BT}\right)-\mathrm{i}\frac{\sigma_0}{2\pi}\log\left[\frac{(\hbar\omega+2\mu)^2}{(\hbar\omega-2\mu)^2+(2k_BT)^2}\right]+\mathrm{i}\frac{4\sigma_0}{\pi}\frac{\mu}{\hbar\omega+\mathrm{i}\hbar\gamma} \tag{2}$$

公式的前两项由带间跃迁导致，第三项与带内跃迁有关。其中 σ_0 是由 $e^2/(4\hbar)$ 定义的通用电导率，μ 是费米能级，γ 是带内散射率。根据石墨烯实部和虚部的变化，可分别制作和设计石墨烯/硅基电吸收型调制器和相位调制器。

早期的石墨烯调制器大多基于电吸收调制原理，属于强度调制器。如图 3(a)所示，Liu 等[34]在 2011 年首次报道了一种基于单层石墨烯的宽带高速直波导式电吸收调制器。在硅波导上铺设单层石墨烯，硅与电极相连并通过外加偏压来控制费米能级，由此控制光的吸收与透射。当费米能级小于阈值时，入射光能量可激发出石墨烯的带间吸收，石墨烯对光的吸收系数增加，调制器表现出高损耗，输出光信号幅度低的特性；而当费米能级高于阈值时，入射光子能量无法激发带间跃迁，石墨烯对光的吸收系数较低，表现出透明性，输出光信号幅度增加。上述过程就是基于石墨烯实现电吸收调制器的基本原理，而图 3(a)所示结构在静态调制情况下能实现 0.1 dB/μm 的消光比，调制速度可以达到 1 GHz 左右，并且有源区的尺寸为 25 μm^2。但是由于单层石墨烯吸收率过低，并且石墨烯和金属电极的接触电阻未经优化，导致回路 *RC* 常数较高，使得这种结构的调制器消光比和带宽都非常小，无法直接应用在光通信系统等场景。

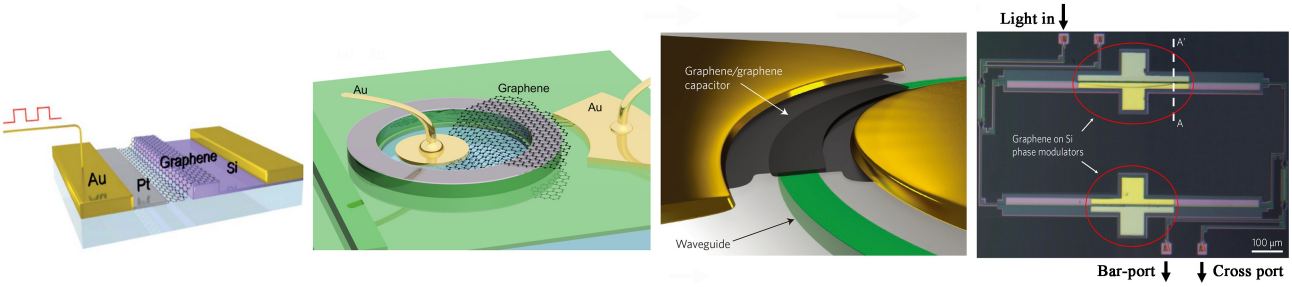


图 3　典型的石墨烯/硅基电光调制器。(a)单层石墨烯电吸收调制器结构[34]；(b)石墨烯电光微环谐振器[35]；(c)基于微环结构的双层石墨烯电光调制器[36]；(d)基于 MZI 结构的石墨烯相位调制器[37]

在提升石墨烯/硅基调制器的调制深度方面，丹麦技术大学的 Ding 等在 2015 年报道了一种石墨烯-硅微环谐振器[35]。如图 3(b)所示，该微环调制器的部分长度与石墨烯异质集成形成电光调制结构，通过改变石墨烯的费米能级，调控微环的环程损耗，从而实现微环在过耦合和欠耦合状态之间的切换，最终实现了 12.5 dB 的调制深度，相对于传统的直波导型调制器的调制深度有了显著提升，但该微环调制器的调制带宽仍受到电路 *RC* 常数的限制，2015 年 Phare 等[36]演示了一种双层石墨烯/硅基微环电光调制器，如图 3(c)所示，该结构保留了硅基微环调制器具有的高消光比的优点，调制深度高达 15 dB；除此之外，还充分利用了石墨烯载流子迁移率高的特点，避免了电路 *RC* 常数对调制带宽的限制，实现了 30 GHz 的 3 dB 调制带宽。

上述石墨烯/硅基调制器都属于强度调制器，能够实现电信号向光信号幅度的转换。除了强度调制器，石墨烯/硅基相位调制器在近年来同样受到了广泛关注。由于通过外加电压调控石墨烯费米能级的同时，石墨烯的实部折射率也会发生变化，根据这个特点，可以制作出石墨烯相位调制器。如图 3(d)是基于 pn 结的硅波导 MZI 结构的石墨烯相位调制

器[37]。该相位调制器的调制效率可以达到0.28 V·cm,并可以实现10 Gbit/s的调制速度。除了典型的MZI型电光相位调制之外,Luan等[38]提出了一种将缝隙波导和微环谐振器相结合的高效高速石墨烯电光调制器,其通过电光调制来改变缝隙波导传播的光的相位和振幅,微环谐振器可以提高调制速度和调制效率,其带宽为119 GHz,调制深度为19 dB,是已报道的带宽最大的石墨烯调制器。

从上述分析不难看出,石墨烯/硅基调制器相比传统硅基调制器,具有调制速度快、光学带宽大、尺寸小、驱动电压低等优势,使得其成为提升硅基调制器性能的一个极具竞争力方案。该异质集成方案有望在保留硅基调制器低成本和与CMOS工艺兼容的优点的基础上,显著提升调制器的关键性能指标,以应对光通信系统对调制器性能的严苛要求。

3 石墨烯/硅基光电探测器

光电探测器是一种将吸收的光子转换为电输出信号的器件。其中,传统的硅/锗基光电探测器已经被广泛应用于多个领域[39],其制作工艺成熟、性能稳定,然而硅材料本身的间接带隙特征导致其光电转换效率难以进一步提升[40-41],而硅材料较宽的禁带宽度(1.1 eV)又导致其探测波段无法进一步拓展至红外范围。为了突破这些限制,人们陆续制备出一些基于新材料的光电探测器,其中石墨烯/硅基探测器凭借高载流子迁移率、宽带吸收等优异性能,吸引了人们的注意。目前石墨烯/硅基光电探测器从探测原理上可分为三大类:光伏效应、光电热电效应、辐射热测量效应。而描述光电探测器性能的典型参数包括光响应度、3 dB探测带宽和暗电流等。下面具体介绍基于不同光电效应的石墨烯探测器。

光伏效应是最早被应用于石墨烯探测器的效应,该效应指光照使不均匀半导体或半导体与金属结合的不同部位之间产生电位差的现象。2009年,Xia等[42]首次制备出以石墨烯作为光电转换材料的基于光伏效应的探测器,如图4(a)所示,该器件具有典型的场效应管结构。其光响应度可以通过外加栅压来进行调控,最高达到0.45 mA/W,还具有超宽的响应范围(300 nm~6 μm),且响应速度比传统硅探测器高三个数量级。但是该器件存在暗电流高,有效探测面积小等问题。在2010年,Mueller等[43]通过使用非对称式插指电极将器件原本对称的能带结构转变成了非对称,如图4(b)。这一改进大幅增加了器件的有效探测面积。结果表明,该探测器在合适的工作栅压下,光响应度达6.1 mA/W,提升了一个数量级。但由于单层石墨烯吸收率为2.3%,所以器件光吸收率与光响应度仍然太低,难以满足实际应用。研究者又陆续通过引入波导等结构提高光吸收率来增强光响应度[44]、采用局域掺杂来调节费米能级以增强其光伏特性[45-46]等方法来优化性能,但基于纯光伏效应的石墨烯探测器仍存在响应波段窄等局限性。因此,研究者们开始尝试基于光辐射热效应和光热电效应来实现光电探测器。

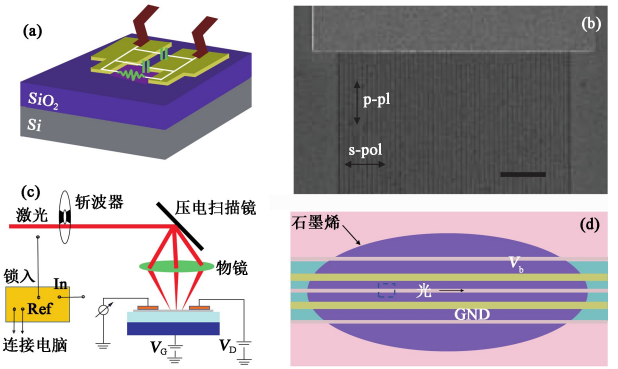


图4 典型的自由空间辐射型石墨烯/硅基光电探测器。(a)基于光伏效应的探测器结构[42];(b)探测器接触区域的扫描电子显微镜图(SEM)[43];(c)基于光辐射热效应的石墨烯/硅基探测器示意图[47];(d)基于光辐射热效应的集成波导石墨烯探测器的彩色SEM俯视图[51]

光辐射热效应是指由入射光子产生的热量导致沟道电导发生变化的现象。基于光辐射热效应下的石墨烯基光电探测器具有小热容和弱电子-声子耦合作用,因此具有响应波段宽、灵敏度高及等效噪声功率低的优势。2013年,Freitag等[47]尝试制备了室温下基于光辐射热效应的石墨烯/硅基光电探测器,如图4(c)所示,其工作原理是在石墨烯场效应晶体管的一个漏电极上施加电压的同时,再通过施加背栅静电调控石墨烯掺杂程度,使用锁相放大器可以同时获得光电流幅度和相位。虽然该探测器的工作波段范围覆盖了可见光和全波段红外光,但是在可见光波段其响应度仅有0.13 A/W,甚至比最初基于光伏效应的探测器还要小一个量级,而其他已报道的基于光辐射热效应的石墨烯/硅基探测器均存在响应度低的问题[48-49]。直到2016年,Wang等[50]研发了一种集成波导石墨烯/硅基光电探测器,如图4(d)所示。研究者通过引入光波导微腔来增加

光生电子寿命，将探测器的响应度提高到 4.6 A/W，突破了基于光辐射热效应探测器的响应度限制。由上可知，基于光辐射热效应下的石墨烯/硅基光电探测器具有响应波段宽、灵敏度高等优势。但目前对于该机制的机理有待进一步探究，器件的响应度也有很大的提升空间。

光热电效应(PTE)是指光导致热电子因温度梯度发生定向移动，从而在外部产生光电流/光电压的一种工作模式，在实现高响应度的同时能够避免暗电流的影响[51]。早期的工作证明了 PTE 效应是石墨烯中主要的光载流子生成机制[51-53]。利用此原理，在 2011 年，Max 等[54]首次制备出了基于光热电效应的光电探测器。他们利用顶栅电极条带将石墨烯分为左右两个部分，通过施加栅压来调控顶栅左右两边的塞贝克系数差异，结果显示其最高响应度只有不到 1 mA/W，但是其内、外量子效率处于较高的水平。为了优化参数(主要是响应度)，研究者通过栅控[55]、掺杂的方法实现了响应度的提升[56-57]，但相对而言其响应度仍处在偏低的水平。直到研究者从更为微观的热载流子冷却的角度来考虑，提出了通过增加石墨烯沟道的长度来实现温差的方法后，终于实现了响应度的大幅提高。2020 年，Gosciniak 等[58]设计了基于 PTE 效应的长程介质加载表面等离子体激元结构，如图 5(a)所示，通过将器件与波导耦合增加了石墨烯沟道长度，进而大大提高了响应度。在温度为 4 510 K 的条件下，不但实现了 200 A/W 的响应度，且为石墨烯/硅基探测器在高温领域的应用提供了宝贵经验。但是若想基于 PET 原理来研究继续提升器件性能的方法，会在加工工艺上有一定的难度。

随着微纳加工水平的提高，人们得以将一些光学微结构(包括光子晶体、光波导等)集成到石墨烯探测器上，以有效调控光的传播方向、相位等属性，这些方法为石墨烯探测器的发展拓宽了道路。其中，光子晶体结构的应用始于 2012 年，Gan 等[59]将石墨烯和二维平面光子晶体结合，如图 5(b)，通过周期性孔的平面内 Bragg 反射和全内反射成功实现了三维空间内的光局域，光吸收率提升到 45%。但这种光子晶体结构加工难度高，集成较困难，于是又提出了一种利用光波导增强石墨烯与光的相互作用长度的方案，理论上只要延长石墨烯与波导的接触长度，就可优化石墨烯的光吸收。基于此理论，Gan 等[60]在波导芯片上制作了带有氮化硅耦合器的石墨烯/硅波导光电探测器，器件结构如图 5(c)所示，光响应度(约 100 mA/W)与响应速度(20 GHz)都比较优秀。此外，还可以将金属纳米颗粒耦合到石墨烯表面即利用表面等离子体效应来提高器件的光电探测效率[61-62]，且此方案可通过改变纳米结构的构型(形状、尺寸等)，实现对特定波长入射光信号的选择性响应。基于此原理，2011 年，Liu 等[63]将金纳米颗粒与石墨烯耦合实现了高效的等离子共振增强探测，该器件不仅达到了 1500%的外量子效率，而且可以实现选择性的多色探测。但利用此原理的方案可探测波段较为单一，且只能在石墨烯表面周期性结构的共振波段工作，因此不适合应用于宽波段探测。

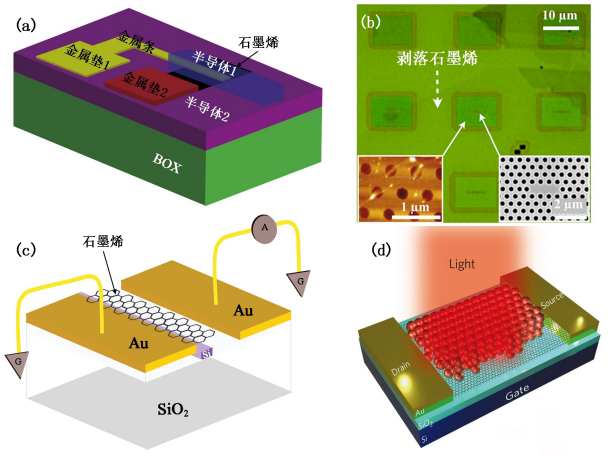


图 5　典型的石墨烯/硅基光电探测器。(a)基于光热电效应的石墨烯光电探测器示意图[58]；(b)与光子晶体结合的石墨烯光电探测器[59]；(c)带有氮化硅耦合器的石墨烯/硅波导光电探测器示意图[60]；(d)与 PbS 量子点结合的石墨烯光电探测器[66]

此外，研究者们还创造性地将石墨烯与其他具有更优良性能的半导体材料结合来弥补石墨烯自身的不足[64-65]，使石墨烯中的载流子寿命延长且迁移率提高，则其光探测器具有较高的光增益和响应度。Konstantatos 等[66]在 2012 年将石墨烯探测器与 PbS 量子点结合，制备出了复合型探测器，如图 5(d)所示，该器件的光响应度较高(4×10^7 A/W)，且增益带宽积可达到 10^9 Hz。这类复合方案虽然可带来较高的响应度，但会降低石墨烯的载流子迁移率，从而牺牲响应速度，且响应波段较窄。

由上文的叙述可知，石墨烯探测器相较于传统硅基探测器，在探测带宽上具有非常明显的优势，但单层石墨烯对光的吸收较弱，使得石墨烯/硅基探测器的响应度通常受限，并且暗电流一般较高，这是未

来石墨烯/硅基探测器的研究需要重点解决的问题。

4 总结与展望

综上所述，石墨烯的优异性质为传统光电器件带来了新的机遇，上文所述的石墨烯/硅基异质集成光电子器件包括调制器与探测器具有明显的优势，如高调制速度、宽光谱范围、小尺寸、低功耗以及与CMOS工艺的高度兼容性。然而，在充分利用石墨烯的优异特性方面仍存在一些挑战。

首先，已报道的石墨烯/硅基热光调制器具有仅几兆赫的调制速度，难以处理更高速的信号，如何进一步提升热光效应的调制速率是石墨烯/硅基热光调制器所面临的主要挑战。潜在的方案包括通过改变石墨烯加热器的形状、尺寸或位置来优化热调控的时间。其次，虽然已报道的石墨烯/硅基电光调制器的最佳调制带宽和调制效率可分别达到119 GHz和0.28 V·cm，但这仍远低于其理论值，特别是调制带宽。石墨烯/硅基电光调制器的理论带宽可达500 GHz，而其中一个重要限制因素是调制结构的寄生电容。如果仅通过增加氧化物绝缘层的厚度来提高电容器的截止频率，会同时降低调制效率和功耗，因此还需要从金属与石墨烯的接触电阻以及设计行波电极结构等方面入手，充分利用石墨烯优异的载流子迁移率，进一步提高石墨烯调制器的带宽，使其接近500 GHz的理论值。此外，石墨烯/硅基异质集成器件的制作良率仍然较低，石墨烯在向硅基芯片转移过程中容易出现质量的劣化，同时容易引入较多杂质的影响，从而导致芯片的插入损耗等性能的劣化，这是限制石墨烯/硅基异质器件未来走向大规模实用化的最大瓶颈。

从纵向角度看，如何推进石墨烯的物理性质充分应用在调制器和探测器的性能提升上，同时挖掘石墨烯与硅光器件异质集成的新颖物理现象，是未来石墨烯/硅基器件的两个重要课题；而从横向看，如何将石墨烯/硅基异质集成器件从实验室真正推向产业，则是科学界和工业界需要共同思考的问题。

参考文献：

[1] Xiao D, Ramsay E, Reid D T, et al. Optical probing of a silicon integrated circuit using electric-field-induced second-harmonic generation[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88(11): 60-64.

[2] Dadap J I, Shan J, Weling A S, et al. Measurement of the vector character of electric fields by optical second-harmonic generation[J]. Opt. Lett., 1999, 24(15): 1059-1061.

[3] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics [J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2006, 12 (6): 1678-1687.

[4] Asghari M. Krishnamoorthy A. Silicon photonics: energy-efficient communication[J]. Nature Photon., 2011(5): 268-270.

[5] Hochberg M, Baehr-Jones T. Towards fabless silicon photonics[J]. Nature Photon., 2010(4): 492-494.

[6] Armstrong J A. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric[J]. Physical Review, 1962, 127(6): 1918-1939.

[7] Zhu Xiaolong, Shi Lei, Schmidt M S, et al. Enhanced light-matter interactions in graphene-covered gold nanovoid arrays [J]. Nano Lett., 2013, 13(10): 4690-4696.

[8] Gu T. Photonic and plasmonic guided modes in graphene-silicon photonic crystals[J]. ACS Photonics, 2015, 2(11): 1552-1558.

[9] Gu T, Petrone N, McMillan J F, et al. Regenerative oscillation and four-wave mixing in graphene optoelectronics [J]. Nature Photonics, 2012, (6): 554-559.

[10] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 22(5696): 666-669.

[11] Bunch J S, Van A M, Verbridge S S, et al. Electromechanical resonators from graphene sheets [J]. Science, 2007, 315(5811): 490-493.

[12] Kim J T, Chung K H, Choi C G. Thermo-optic mode extinction modulator based on graphene plasmonic waveguide [J]. Opt. Express, 2013, 21(13): 15280-15286.

[13] Wang F, Zhang Y, Tian C, et al. Gate-variable optical transitions in grapheme[J]. Science, 2008, 320(5873): 206-209.

[14] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.

[15] Schwierz F. Graphene transistors [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(57): 487-496.

[16] Vakil A, Enheta N. Transformation optics using grapheme [J]. Science, 2011, 332(6035): 487-494.

[17] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-387.

[18] Ferrari A C, Francesco B, Vladimir Fal'ko, et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems [J]. Nanoscale, 2015, 7(11): 4598-4810.

[19] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F, et al. Silicon optical modulators[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 518-526.

[20] Timurdogan E, Sorace-Agaskar C M, Sun J, et al. An ultralow power athermal silicon modulator [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 4008.

[21] Kang J，Kim H，Kim K S，et al. High-performance graphene-based transparent flexible heaters[J]. Nano Lett.，2011，11(12)：5154-5158.

[22] Sherwood-Droz N，Wang H，Chen L，et al. Optical 4×4 hitless silicon router for optical networks-on-chip (NoC)[J]. Opt. Express，2008，20(16)：15915-15922.

[23] Gu L，Jiang W，Chen X，et al. Thermooptically tuned photonic crystal waveguide silicon-on-insulator Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2007，19(5)：342.

[24] Dong Po，Qian Wei，Liang Hong，et al. Thermally tunable silicon racetrack resonators with ultralow tuning power[J]. Opt. Express，2010，18(19)：20298-20304.

[25] Sun P，Reano R M. Submilliwatt thermo-optic switches using free-standing silicon-on-insulator strip waveguides[J]. Opt. Express，2010，18(8)：8406-8411.

[26] Kang J，Kim H，Kim K S，et al. High-performance graphene-based transparent flexible heaters[J]. Nano Lett.，2011，11(12)：5154-5158.

[27] Gan S，Cheng C T，Zhan Y H，et al. A highly efficient thermo-optic microring modulator assisted by graphene[J]. Nanoscale，2015，7(47)：20249-20255.

[28] Yu L，Yin Y，Shi Y，et al. Thermally tunable silicon photonic microdisk resonator with transparent graphene nanoheaters[J]. Optica，2016，3(2)：159-166.

[29] Yan S，Zhu X，Frandsen L，et al. Slow-light-enhanced energy efficiency for graphene microheaters on silicon photonic crystal waveguides[J]. Nature Communications，2017，8(1)：14411.

[30] Soref R，Bennett B R. Electrooptical effects in silicon[J]. IEEE J. of Quantum Electron.，1987，23(1)：123-129.

[31] Du X，Skachko I，Barker A，et al. Approaching ballistic transport in suspended graphene [J]. Nature Nanotechnology，2008，3(8)：491-495.

[32] Xu Q，Schmidt B，Pradhan S，et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. Nature，2005，435(7040)：325-327.

[33] Chang Y C，Liu C H，Zhong Z H，et al. Extracting the complex optical conductivity of mono- and bilayer graphene by ellipsometry[J]. Appl. Phys. Lett.，2014，104(26)：261909.1-261909.4.

[34] Liu M，Yin X，Ulin-Avila E，et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. Nature，2011，474(7349)：64-67.

[35] Ding Y，Zhu X，Xiao S，et al. Effective electro-optical modulation with high extinction ratio by a graphene-silicon microring resonator[J]. Nano Lett.，2015，15(7)：4393-4400.

[36] Phare C，Daniel Lee Y H，Cardenas J，et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth[J]. Nature Photonics，2015，9(8)：511-514.

[37] Sorianello V，Midrio M，Contestabile G，et al. Graphene-silicon phase modulators with gigahertz bandwidth [J]. Nature Photonics，2018，12(1)：40-44.

[38] Luan C，Liu Y，Kong D，et al. Integrated 2 μm electro-optic modulator based on grapheme-silicon slot-waveguide microring resonator[C]// 2022 Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)，2022.

[39] Jalali B，Fathpour S. Silicon photonics[J]. J. of Lightwave Technol.，2007，24(12)：4600-4615.

[40] Casalino M，Lodice M，Sirleto L，et al. Asymmetric MSM sub-bandgap all-silicon photodetector with low dark current [J]. Opt. Express，2013，21(23)：28072-28082.

[41] Goykhman I，Desiatov B，Khurgin J B，et al. Locally-oxidized silicon surface-plasmon Schottky detector for telecom wavelengths [C]// IEEE Inter. Conf. on Group Ⅳ Photonics，2011：34-37.

[42] Xia F，Mueller T，Lin Y M，et al. Ultrafast graphene photodetector[J]. Nature Nanotechnology，2009，4(12)：839-843.

[43] Mueller T，Xia F，Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications[J]. Nature Photonics，2010，4(5)：297-301.

[44] Wang X，Cheng Z，Xu K，et al. High responsivity graphene/silicon heterostructure waveguide photodetectors [J]. Nature Photonics，2013，7(11)：888-891.

[45] Liu N，Tian H，Schwartz G，et al. Large-area，transparent，and flexible infrared photodetector fabricated using P-N junctions formed by N-doping chemical vapor deposition grown graphene[J]. Nano Lett.，2014，14(7)：3702-3708.

[46] Feng B，Pan X，Liu T，et al. A broadband photoelectronic detector in a silicon nanopillar array with high detectivity enhanced by a monolayer graphene[J]. Nano Lett.，2021，21(13)：5655-5662.

[47] Freitag M，Low T，Xia F N，et al. Photoconductivity of biased graphene[J]. Nature Photonics，2013，7(1)：53-59.

[48] 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.

[49] Engel M，Steiner M，Lombardo A，et al. Light-matter interaction in a microcavity-controlled graphene transistor [J]. Nature Communications，2012，3(1)：1-6.

[50] Wang Y B，Yin W H，Han Q，et al. Bolometric effect in a waveguide-integrated graphene photodetector [J]. Chinese Physics B，2016，25(11)：118103.

[51] Gabor N M，Song J，Ma Q，et al. Hot carrier-assisted intrinsic photo-response in graphene[J]. Science，2011，334(6056)：648-652.

[52] Song J C，Rudner M S，Marcus C M，et al. Hot carrier transport and photocurrent response in graphene[J]. Nano Lett.，2011，11(11)：4688-4692.

[53] Xu X，Gabor N M，Alden J S，et al. Photo-thermoelectric

effect at a graphene interface junction[J]. Nano Lett., 2010, 10(2): 562-566.

[54] Lemme M C, Koppens F, Falk A L, et al. Gate-activated photo-response in a graphene p-n junction[J]. Nano Lett., 2010, 11(10): 4134-4137.

[55] Freitag M, Low T, Avouris P. Increased responsivity of suspended graphene photodetectors[J]. Nano Lett., 2013, 13(4): 1644-1648.

[56] Brida D, Tomadin A, Manzoni C, et al. Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene[J]. Nature Communications, 2013, 4(7): 1987.

[57] Wang D, Allcca A E L, Chung T F, et al. Enhancing the graphene photocurrent using surface plasmons and a p-n junction[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 126.

[58] Gosciniak J, Rasras M, Khurgin J B. Ultrafast plasmonic graphene photodetector based on channel photo-thermoelectric effect[J]. ACS Photonics, 2020, 7(2): 488-498.

[59] Gan X, Mak K F, Gao Y, et al. Strong enhancement of light-matter interaction in graphene coupled to a photonic crystal nanocavity[J]. Nano Lett., 2012, 12(11): 562-566.

[60] 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.

[61] Xia F, Mueller T, Golizadeh-Mojarad R, et al. Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor[J]. Nano Lett., 2009, 9(3): 1039-1044.

[62] Hohenau A, Krenn J R, Beermann Jonas, et al. Spectroscopy and nonlinear microscopy of Au nanoparticle arrays: experiment and theory[J]. Phys. Rev. B, 2006, 6(73): 155404.

[63] Liu Y, Cheng R, Liao L, et al. Plasmon resonance enhanced multicolour photodetection by graphene [J]. Nature Communications, 2011, 2(1): 57-59.

[64] 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.

[65] Gao A, Liu E, Long M, et al. Gate-tunable rectification inversion and photovoltaic detection in graphene/WSe_2 heterostructures[J]. Appl. Phys. Lett., 2016, 9(22): 223501.1-223501.5.

[66] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 9(7): 363-368.

作者简介：

彭文怡(2000－)，女，硕士研究生，研究方向为硅基集成光电子学；

严思琦(1991－)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事硅基异质集成光电子器件的研究；

唐　明(1979－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事超大容量光通信系统、器件与关键技术的研究。