

石墨烯光电集成技术研究进展

吴云^{1,3*} 曹正义^{1,3} 陶然^{1,3} 张广琦^{1,3} 李忠辉^{1,2,3}⁽¹⁾ 中国电科碳基电子重点实验室, 南京, 210016) ⁽²⁾ 固态微波器件与电路全国重点实验室, 南京, 210016)⁽³⁾ 南京电子器件研究所, 南京, 210016)

2024-11-14 收稿, 2024-12-15 收改稿

摘要: 石墨烯具有极高的迁移率和光电耦合效率, 展示出的光电性能远超硅及其他光电材料, 此外石墨烯在异质集成时不受晶格匹配的限制, 可同多种材料实现完美兼容, 这对面临多材料体系集成挑战的光电集成技术而言, 几乎是理想材料。本文聚焦石墨烯在光电集成技术方面的优势, 回顾了石墨烯在光电探测器、电光调制器方面的研究进展, 总结各类器件的优势及存在的缺陷, 并就石墨烯在光电集成方面的未来发展进行了展望。

关键词: 光电集成; 微波光子; 光通信

中图分类号: TN929.1; TQ127.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3819(2024)06-0576-09

Progress in Graphene Optoelectronic Integration Technology

WU Yun^{1,3} CAO Zhengyi^{1,3} TAO Ran^{1,3} ZHANG Guangqi^{1,3} LI Zhonghui^{1,2,3}⁽¹⁾ CETC Key Laboratory of Carbon-based Electronics, Nanjing, 210016, CHN)⁽²⁾ National Key Laboratory of Solid-state Microwave Devices and Circuits, Nanjing, 210016, CHN)⁽³⁾ Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing, 210016, CHN)

Abstract: Graphene has extremely high mobility and optoelectronic coupling efficiency, exhibiting optoelectronic properties far superior to silicon and other materials. In addition, graphene is free from lattice matching and can achieve perfect compatibility with many materials, which makes it an ideal material for optoelectronic applications. In this article, the advantages of graphene in optoelectronic integration technology are highlighted, the research progress of graphene in photodetectors and electro-optic modulators are reviewed, the advantages and disadvantages of various devices are summarized, and the future development of graphene in optoelectronic integration is also discussed.

Key words: optoelectronic integration; microwave photon; optical communication

引言

随着智能化、物联网等概念的提出和推动, 数据交换和传输的需求与日俱增, 未来全球电信网络以及雷达、通信和航天工业中新兴的大规模应用都需要全新的技术来解决当前电子技术对于大容量和超宽带连接的限制问题。光电集成芯片具有更高的精度、更大的带宽和更强的抗干扰能力, 在下

一代无线技术竞争中有着光明的前景。

同硅基微电子集成技术不同, 光电通信链路中核心器件涉及不同的材料体系, 如激光器用磷化铟、调制器用铌酸锂、探测器用铟镓砷, 而光波导和数字化处理则用硅, 因此光电集成技术的发展必然会面对功能集成和芯片集成两大挑战。当前采用的光电混合集成技术, 即采用键合或倒装焊的方法将不同材料制备的器件聚于一块, 因规避了材料间的晶格失配而降低了工艺难度, 不同材料体系的优

* 联系作者: E-mail: wuyun012@126.com

势得以发挥而实现了功能的集成,但远低于微电子加工水平的异质集成对准精度基本界定了集成度的上限,并且通信链路各器件独自制备的重复加工工艺(如金属化、光刻等)以及集成封装的低成品率导致的巨大成本增量将成为混合集成技术被市场接受的严重阻力。

单片异质集成技术是基于一种主体材料而将其他材料通过外延或键合方式实现材料晶圆级集成,然后直接采用单片工艺完成各个功能器件的制备和互联,集成度和成本都远优于混合集成技术^[1]。但由于异质外延严苛的晶格匹配制约以及不同材料体系的兼容性,存在较大挑战,当前单片光电集成技术也多限于两类材料的集成,如Wang等人通过外延生长在硅基衬底上实现了III-V族薄膜的制备,并以此为基础通过单片集成技术研制出激光器^[2]。麻省理工学院(MIT)林肯实验室则将铌酸锂薄膜键合于152.4 mm(6英寸)硅晶圆,然后再通过单片集成技术制备出调制器^[3]。因此,尽管单片光电集成技术有高性能、高产率以及低成本等红利,但多种材料融于“一片”的难度却相当大。

石墨烯超高的载流子迁移率、宽的光谱吸收范围、大的响应带宽等优异的光电特性,近年来在光电器件和集成技术方面的研究备受关注。欧盟自2013年石墨烯旗舰计划开展以来,在光电器件方面积累了多年的理论基础及原型器件研究经验,至2022年石墨烯中试线(2D-EPL)投入建设,旨在缩小石墨烯光电器件的实验室制造和大批量生产之间的差距,因此也受到世界各国科研工作者的关注,并开展了系统的研究。当前,基于石墨烯的锁模激光器、光电探测器、电光调制器、光电混频器等研究均取得了快速地发展,不仅展示出显著的光电性能优势,在同光波导互联以及CMOS集成方面还展示出独特天赋,有望开创出一条新的光电集成路径。

本文聚焦石墨烯光电器件和集成技术,重点介绍石墨烯的材料优势,回顾了近年石墨烯在光电探测器、电光调制器以及光电混频器方面遇到的问题以及进展,并对石墨烯光电集成技术的未来发展进行分析和展望。

1 石墨烯光电集成技术优势

尽管在当前讨论光电集成发展时,仍以硅基光电集成为主流趋势,但为满足日趋加速的网络发展需求,未来光电集成技术仍需满足高速(通讯带宽50 Gb·s⁻¹)、小特征尺寸(<100 μm²)、低插入损耗(≤

1 dB))、低能耗(100 μW·GHz⁻¹),但因为各材料体系制备器件时需要考虑各种性能的平衡,导致当前任何一种材料都无法同时满足以上需求。例如,对于移相电光调制器而言,调制效率往往通过半波电压(V_π,调制半波长光程差所需电压)和调制器长度(L)的乘积表示,对于铌酸锂而言,V_πL=18 V·mm,即意味着如果将半波电压降到数字电路适宜的1 V左右时,器件的长度将达到1.8 cm,而过大的面积并不利于多通道通信链路的应用,如光计算和相控阵等。

相对而言,石墨烯材料非常优越的光电性能,基于石墨烯的光电器件有望以很小的有源尺寸实现高响应、低能耗以及超快工作速度,如图1(a)所示。

石墨烯具有极高的调制效率,如图1(b)所示,石墨烯在费米能级为0 eV时,吸收系数达0.2 dB/μm,通过费米能级的改变,吸收系数可实现高达10³的调制变化(较高质量石墨烯,红点表示)。按此效率,设计100 μm的调制器,即可实现20 dB的消光比,而V_πL值仅1 V·mm,因此同尺寸的石墨

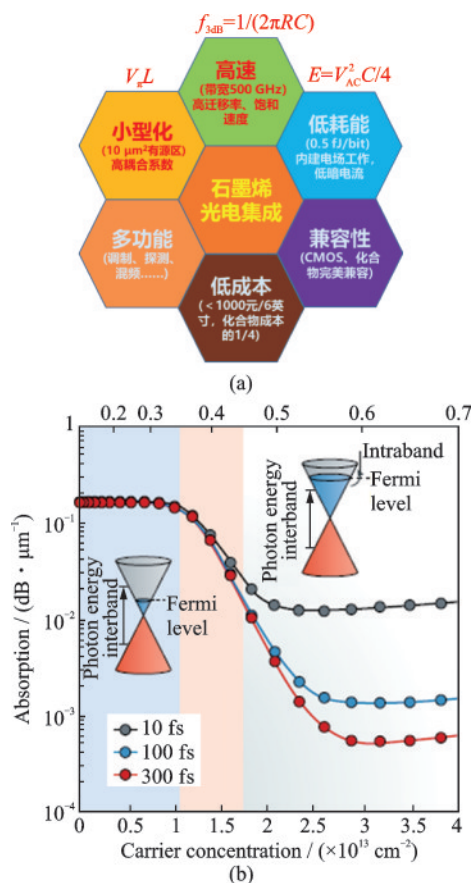


图1 (a)石墨烯光电吸收系数随费米能级被调制;(b)石墨烯光电性能优势^[4]

Fig.1 (a) optical absorptions of graphene modulated with fer-mi level; (b) Advantages of graphene optoelectronic properties^[4]

烯调制器半波电压最低可到0.1 V。当石墨烯费米能级增加至0.6 eV后,吸收系数低至0.000 6 dB/ μm ,由此得到插入损耗仅0.06 dB。当然随着石墨烯材料质量的降低(灰点),这个值可能达到1 dB。此外,对于未来海量(高达10 050 Gb $\cdot\text{s}^{-1}$)的通信速度,光电通信链路中每个器件的能耗都可能成为光电芯片应用的制约因素。

石墨烯在制备调制器时,制备石墨烯/电介质/石墨烯叠层电容结构,利用场效应实现石墨烯中费米能级的调控,只产生电荷充放电而不产生焦耳热

能,而基于高调制效率,调制器可设计较小的电容和半波电压,理论上可达到低于1 fJ/bit的能耗。而石墨烯在制备探测器时,近期采用的光热电机理器件工作于零偏压,暗电流低至0.1 nA,器件能耗几乎全部转化为有效输出。其次石墨烯还有超高的迁移率(200 000 cm²·V⁻¹·s⁻¹),这有利于确保器件受光后载流子获得较大扩散速度,而产生的热载流子则具有较大散射距离,由此石墨烯光电器件可在相对较大的尺寸(>1 μm)下实现超高的工作频率(高达500 GHz),这在近期的研究工作中已得到证实^[5]。

表1 石墨烯和其他材料的光电性能对比

Tab.1 Comparison of optoelectronic properties between graphene and other materials

Ref.	Material	Frequency/GHz	$V_{\pi}L/(\text{V}\cdot\text{mm})$	Responsivity /(A·W ⁻¹)	Insertion loss /(dB·mm ⁻¹)	Energy consumption /(fJ·bit ⁻¹)
[6-8]	Si	<50	20	—	1.0	30 @40 GHz
[9-10]	InP	10-200	9	0.6	0.7	—
[11-12]	LN	10-80	18	—	0.3	22 @10 GHz
[13-14]	Graphene	10-500	1	2.0	0.1	10 000 @40 GHz

二维材料因界面无悬挂键,在同其他材料进行异质集成时也有得天独厚的优势。通过范德华转移集成的方法,不仅能实现二维材料之间的堆叠集成,还能和电介质、金属直接集成构成功能器件^[15-16],甚至能将二维材料构建的不同类别器件集成在一起构成多功能系统^[17-20]。众多研究成果表明,二维材料转必能走出一条高效而独特的异质集成路径。

基于石墨烯自身光电优势和易于集成的特性,欧盟于2018年便设计出石墨烯和硅的单片集成方案,如图2所示,在硅基光学和数字平台上,由波导集成的方案实现石墨烯光电探测器和电光调制器的集成。该方案后续由IMEC、欧盟石墨烯研究院等单位持续推进并取得了显著成效。

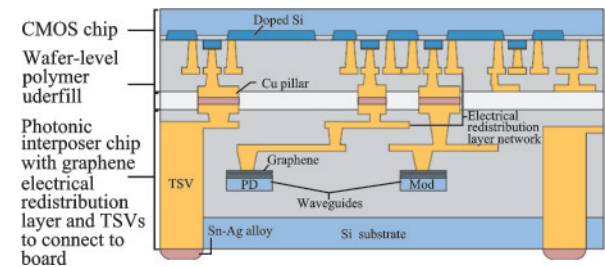


图2 CMOS和石墨烯光电集成电路^[4]

Fig.2 Integration of a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) circuit on a graphene photonics circuit^[4]

微波光子技术是一种将微波和光子集成起来的技术,在通信、传感、雷达等领域有着重要应用。由于需要利用光子学的手段完成微波信号的混频、倍

频、滤波等功能,因此在微波光子处理中不仅需要激光器、电光调制器、光电探测器等光学器件,还需要低噪声放大器、功率放大器等微波器件[如图3(a)所示],而在如此复杂的功能需求背景下,实现混合集成都面临诸多挑战,发展单片集成更似遥不可及。

石墨烯优异的光电性能和独特的集成技术特点给微波光子集成技术带了新的希望,如图3(b)所

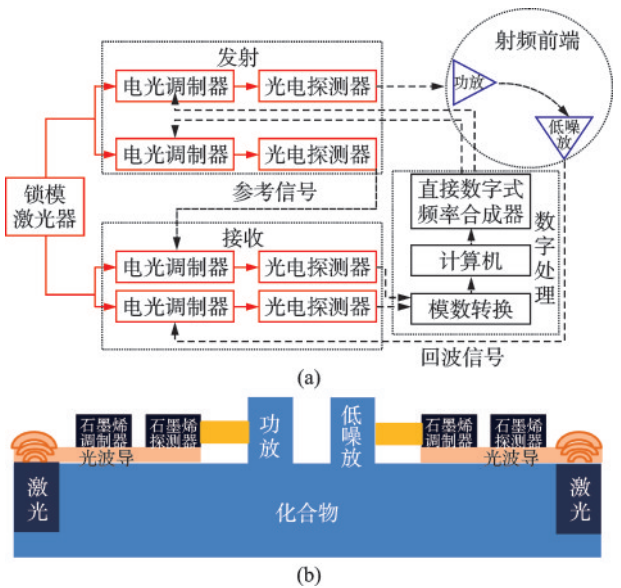


图3 (a)微波光子收发系统示意图;(b)石墨烯单片光电集成技术

Fig.3 (a) Schematic diagram of microwave photonic transceiver; (b) Graphene monolithic integration technology

示,尽量发挥化合物材料在激光器、功率放大器和低噪声放大器等器件应用上的优势,将石墨烯光电器件进行有机融合,如在化合物衬底上预留一定空间制备 SiN 波导,并由此实现电光调制器、探测器集成连通,形成独有的单片集成功能系统。单片光电集成技术不仅可以提高各光电器件的对准精度,降低系统插入损耗,还能将系统成本降低到混合集成的 1/3 以下。当然,优良的光电器件性能和足够的设计冗余,是实现上述集成技术的基础。

2 石墨烯光电探测器

光电探测器简而言之就是将光响应转化为电响应的器件。在研究前期,单层石墨烯存在对垂直入射光仅 2.3% 的吸收率以及器件沟道无法夹断两个问题,一度给科研工作者造成较大困扰,研究人员提出了利用光学“天线”(诸如金属等离子激元、纳米颗粒等)和光学共振腔等不同方法来提高光的吸收,但往往在器件构建中增加了时延因素(如量子点和石墨烯之间的渡越),导致高响应和高速无法同时实现。

随着石墨烯和光的相互作用机理研究的深入,有别于光电导效应的其他效应(如光伏效应、温差电效应、辐射热效应等)逐步被发现并在某些器件中成为器件响应主要因素。其中,利用石墨烯自身受光后形成的温差构建内部电场的温差电效应近年逐步展示出其优越性。2019 年, Muench 等通过在光波导集成的石墨烯沟道上方引入双栅结构,利用其调控得到非对称沟道增强了温差电效应(如图 4 所示),在零偏压下实现了 12.2 V/W 的响应度,器件带宽也达到 42 GHz^[21]。由于零偏压工作,且具有很低的噪声,

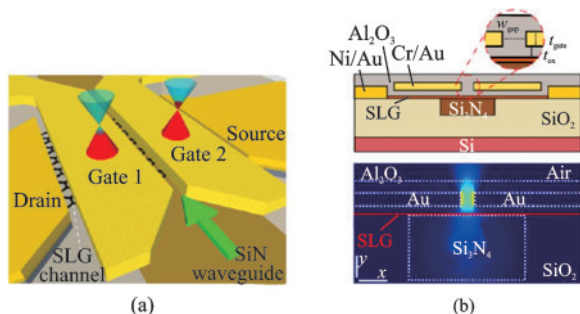


图 4 双栅调制石墨烯光电探测器^[21]: (a) 双栅调制石墨烯器件示意图; (b) 石墨烯调制器的截面示意图

Fig.4 Dual gate modulated graphene photodetector^[21]: (a) Schematic diagram of dual gate modulated graphene device; (b) Sectional schematic diagram of graphene modulator

这利于降低光通信中的能耗和误码率,提高通信质量。但受器件结构的限制(栅电极引入的寄生),器件带宽并没达到石墨烯的理想状态。

2023 年,苏黎世联邦理工学院 Juerg Leuthold 教授和 Stefan M. Koepfli 教授展示了一种新的石墨烯光电探测器结构,通过非同种电极及背栅调控构建非对称沟道,结合超结构电极增强石墨烯的光响应^[5]。该器件具有大于 500 GHz 的高带宽、极低暗电流以及能在宽光谱(1 400~4 200 nm)工作的能力,并且展示了迄今为止已知的最高石墨烯数据速率(132 Gb·s⁻¹),器件结构和性能如图 5 所示。此外器件展示出非常高的线性度,在输入光功率变化接近 10⁵ 下,仍具有很高的线性输出光电流,最大输入

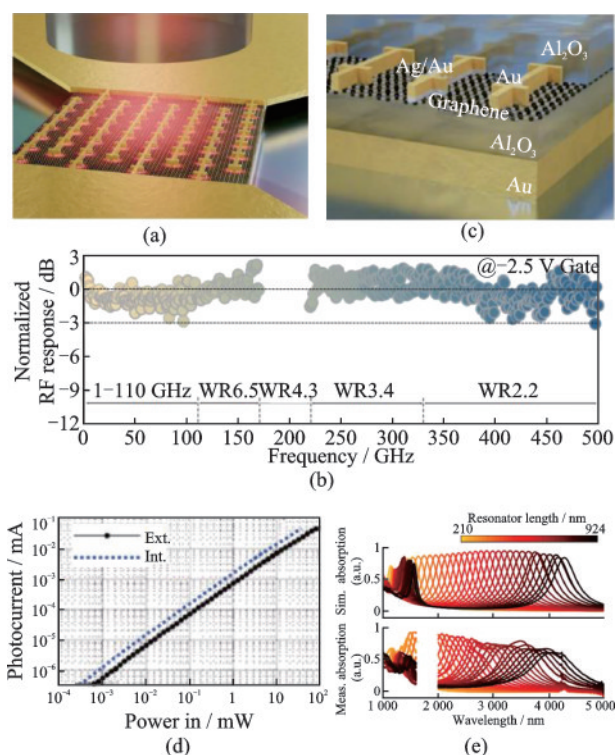


图 5 石墨烯探测器结构及光电性能^[5]: (a) 由单模光纤从顶部直接照射的器件示意图; (b) 石墨烯光电探测器在 2~500 GHz 范围内的归一化频率响应; (c) 器件结构示意图; (d) 光输入功率超过五个数量级的外在光电流; (e) 实现可响应波长的超结构仿真

Fig.5 Structure and performance of graphene photodetector^[5]: (a) Schematic diagram of a device directly illuminated from the top by a single-mode fiber; (b) Normalized frequency response of the graphene PD over a range of 2 to 500 GHz; (c) Schematic diagram of device structure; (d) Extracted photocurrent for an optical input power sweep over five orders of magnitude; (e) Wave-length tunability of the metamaterial structure with the simulated

光功率达到 100 mW 以上,可满足很多光通信技术的应用需求^[5]。

石墨烯的平面结构和转移方法使其非常适合制备光电集成器件。为探索石墨烯在光电集成技术中的应用潜力,2022年武汉光电国家实验室提出并用实验证明了一种基于 90°光混合和石墨烯等离子体缝隙波导光电探测器的集成相干光接收器^[22]。如图 6 所示,4 路通道中的每个探测器都具有面积小、带宽大(超过 66 GHz)的特点,在单极化载波上实现了 $200 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 正交相移键控和 $240 \text{ Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 正交振幅调制信号的接收,附加功耗低于 14 fJ/bit ^[22]。这种基于石墨烯的相干光接收器在 400 GHz 以太网和 800 GHz 以太网技术中具有潜在的应用前景,为未来的高速相干光通信网络探索了一条新路。

相对器件结构而言,石墨烯材料结构对光吸收

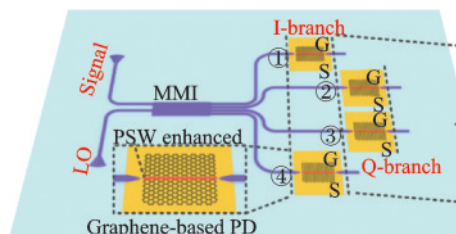


图 6 波导集成石墨烯光电探测器^[22]

Fig.6 Waveguide integration graphene photodetector^[22]

也展示出直接影响。2024 年,北京大学和北京石墨烯研究院利用一定角度堆叠的双层石墨烯增强光的吸收性能,器件结构和性能如图 7 所示^[23]。该双层石墨烯探测器在波长为 1 550 nm 的通信光下实现了 0.65 A/W 的高响应度,相对单层石墨烯同结构器件响应度提高的三倍。同时,研究人员不仅验证了高工作速度(带宽 66 GHz),还展示了大规模探

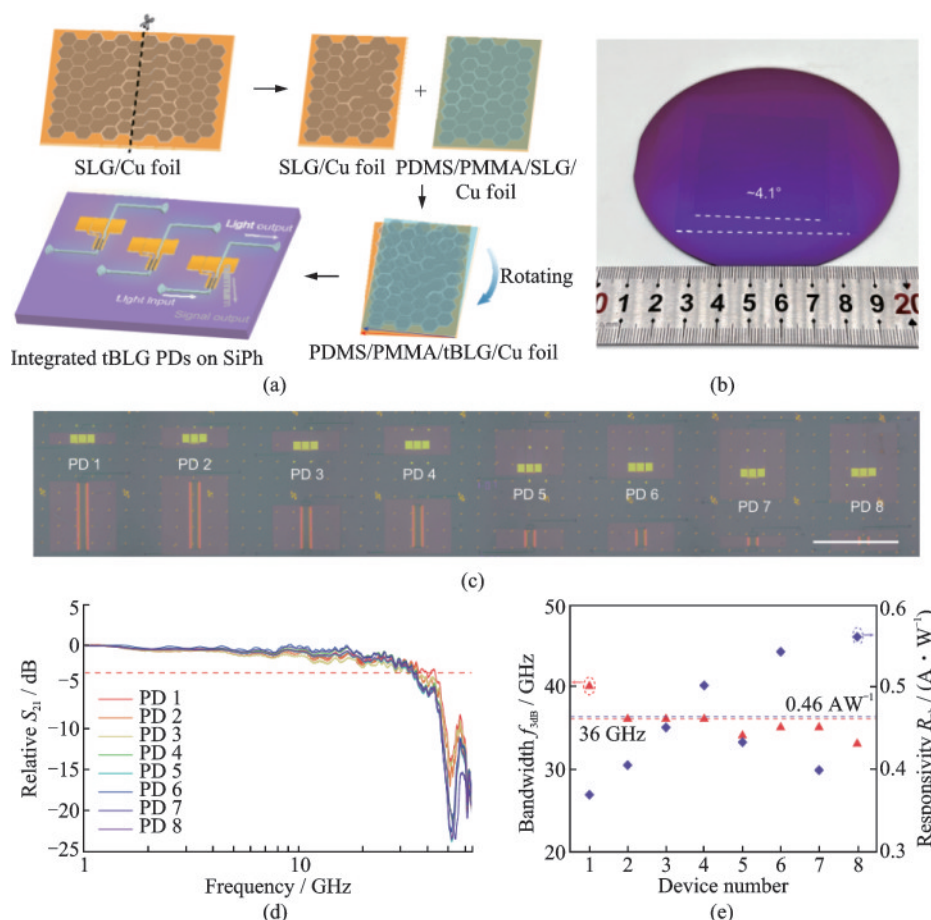


图 7 双层石墨烯光电探测器^[23]:(a)大规模转移双层石墨烯和制造双层石墨烯光电探测器的示意图;(b)101.6 mm SiO_2/Si 晶片上转移的双层石墨烯的光学图像;(c)双层石墨烯光电探测器阵列的光学显微镜照片;(d)8 个光电探测器的频率响应;(e)8 个探测器器件的响应度和 3 dB 带宽统计分布

Fig.7 Bilayer graphene photodetector^[23]:(a)Schematic illustration of the large-scale transfer of tBLG and fabrication of tBLG photodetectors;(b)Optical image of transferred tBLG on 101.6-mm SiO_2/Si wafer;(c)Optical image of tBLG photodetectors array;(d)Measured frequency response of 8 tBLG photodetectors;(e)Statistical histogram of photo-responsivity and 3-dB bandwidth from 8 devices

测器阵列制备和硅光集成能力,为未来光通信设备的发展提供了新的材料平台^[23]。

南京电子器件研究所的石墨烯器件研究团队近年聚焦石墨烯光电性能优势和集成工艺开发,开发了一种通用的Au膜转移的自对准器件制备技术,制备了基于金-石墨烯-金沟道的平面光电探测器以及集成于波导上方的石墨烯光电探测器,器件最大响应度达到2 A/W,3 dB带宽超过110 GHz。通过对硅脊波导表面的简易平坦化处理,即可实现石墨烯和波导的紧密贴合,由此可制备多通道探测器阵列。如图8(b)所示,该团队制备的四通道光电探测器最大响应度0.5 A/W,且器件响应度电流密度差值小于15%,单个3 dB带宽均超过66 GHz,这为实现基于石墨烯的光电集成提供了技术支持。

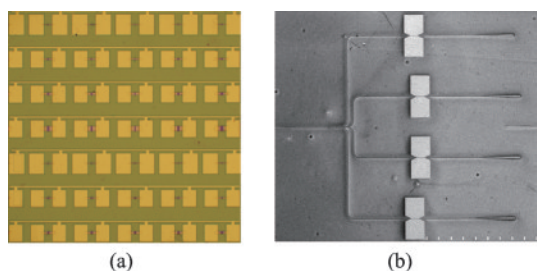


图8 (a)平面型石墨烯探测器阵列;(b)波导集成4通道光电探测器

Fig.8 (a) Flat graphene photodetector array; (b) Waveguide integration four channel graphene photodetector

综上所述,石墨烯在光电探测器方面已展示出远超化合物光电器件的超大带宽,响应度、暗电流、饱和功率、线性度等性能也可媲美化合物探测器最好水平,且石墨烯转移工艺简单灵活,可同各类光波导完美融合,实现性能提升的情况下不引入设计和工艺的复杂度,因此在实现光电集成时具有一定的性能及工艺冗余量。当然目前石墨烯光电探测器仍存在问题,如光导型探测器暗电流很大,作为接收机工作时会造成较高信噪比;温差电目前仍需提高响应度,进而提高输出微波信号的功率,以在微波光子处理中具有更高的性能匹配性。为解决这些问题,一方面需要继续优化石墨烯材料质量,如提高迁移率的同时降低最低载流子浓度,这样可以提高器件响应度的同时保持大带宽工作;另一方面需要开发更合适石墨烯的转移及器件加工工艺,充分发掘出材料的潜力,为片上光电集成提供更大设计空间。

3 石墨烯电光调制器

利用石墨烯的光电吸收(费米能级小于半光子能量主导)以及电调后介电系数(费米能级大于半光子能量主导)的变化规律,即可通过改变石墨烯的费米能级实现对通过石墨烯的激光进行信号调制。鉴于石墨烯单原子层的特点,目前多采用在光波导上平行放置石墨烯的方案来增加石墨烯和光的耦合效率。

2011年,Ming Liu等首次实现了基于SOI平台的单层石墨烯电吸收光调制器。由于石墨烯调制效率较高(0.1 dB/ μm),器件有源面积仅25 μm^2 。但由于单层石墨烯结构限制以及工艺尚不成熟,器件3 dB带宽仅1.2 GHz,能耗也相对较大^[24]。随着研究的深入,人们逐渐发现采用双层石墨烯并利用场效应可实现费米能级的互调,由此不仅可以提高石墨烯调制效率,还能提高器件带宽,并降低能耗^[25-26]。

2023年,Hitesh A等人在硅波导上堆叠石墨烯/电介质/石墨烯制备出光电调制器,如图9所示,器件不仅选用从石墨片上剥离得到的石墨烯,还在石墨烯上方覆盖六方氮化硼(hBN)进行包覆,以最

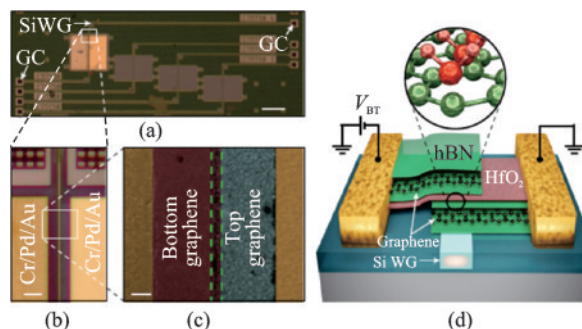


图9 基于六方氮化硼-石墨烯-六方氮化硼叠层结构的电光调制器^[27]:(a)由两个光栅耦合器组成的光子器件的光学图像;(b)器件细致结构的扫描电子显微镜图像;(c)底部和顶部石墨烯的金属接触电极分别为黄色/棕色以及紫色/浅蓝色区域;(d)具有hBN-HfO₂-hBN电介质电光调制器的横截面示意图

Fig.9 Graphene electro-optical modulators based on hBN-graphene-hBN stacks: (a) Optical image of a photonic device consisting of two grating couplers; (b) Scanning electron microscopy image of the detailed structure of the device; (c) The metal contacts of graphene electrodes are yellow/brown at bottom and violet and light blue at top; (d) Schematic cross-section of an EA modulator with an hBN-HfO₂-hBN dielectric

大限度的降低介质材料制备时引入的界面态。器件以 $27 \mu\text{m}^2$ 的有源尺寸最终实现了 39 GHz 的带宽以及低至 0.16 pW/bit 的能耗^[27]。然而,这种机械剥离的多层堆叠技术不仅对工艺要求极高,且制备的器件尺寸一般较小(小于 $50 \mu\text{m}^2$),这对片上集成化技术的推进非常不利。

CVD 法制备的石墨烯具有较大的晶圆面积,比利时微电子研究中心(IMEC)和西班牙一家石墨烯材料研制单位 Graphenea 近年致力于推进 CVD 石

墨烯的晶圆集成工艺。2023 年,他们使用单层石墨烯电吸收调制器作为测试对象,在 300 mm (12 英寸) CMOS 标准工艺线上成功制备了晶圆级阵列化电光调制器件,如图 10 所示,器件展示了 50 dB/mm 的调制深度和 15.1 GHz 的带宽^[28]。虽然该研究器件性能同其他石墨烯调制器有一定的差距,但这不仅验证了石墨烯晶圆集成的可行性,还验证了石墨烯光电器件和 CMOS 工艺的兼容性,为以石墨烯制备更复杂的光电集成系统注入了信心。

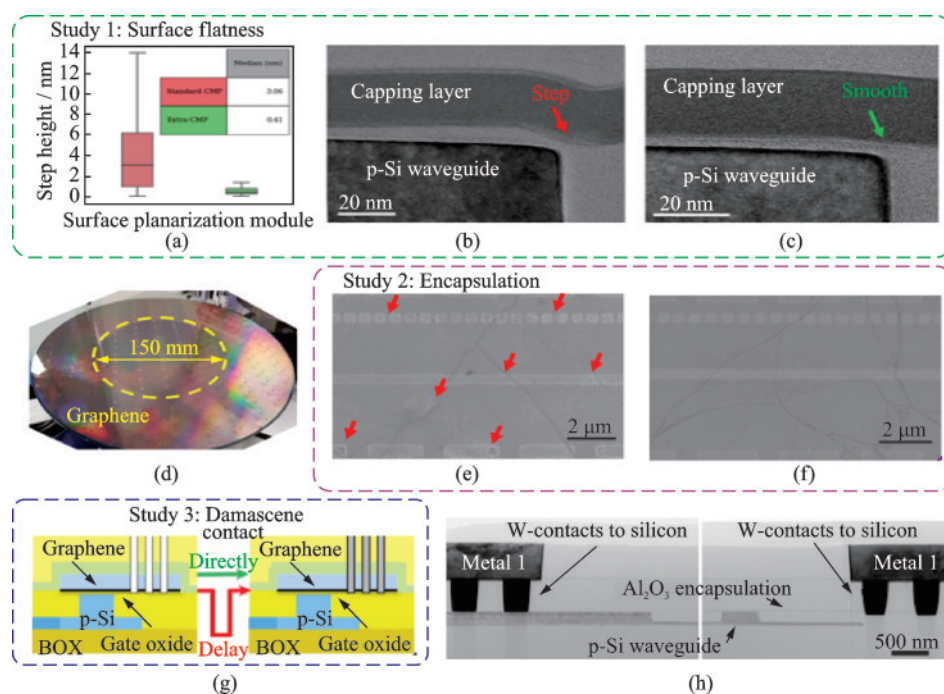


图 10 300 mm 硅晶圆上集成的石墨烯光电调制器^[28]: (a) 表面平坦化(CMP)后剩余台阶高度的比较; (b) 标准 CMP 在晶片波导边缘拍摄的交叉 TEM 图像; (c) 额外 CMP 在晶片波导边缘拍摄的交叉 TEM 图像; (d) 中心转移了 150 mm 石墨烯的 300 mm 晶圆的俯视图; (e) 短浸泡时间的晶圆俯视图; (f) 长浸泡时间的晶圆俯视图; (g) 石墨烯器件接触研究方案的截面图示; (h) 器件完成后截面的透射电子显微镜照片

Fig.10 Graphene electro-absorption modulators on a 300 mm Si wafer^[28]: (a) Comparison of the step height remaining after surface planarization; (b) Cross-TEM images taken at the waveguide edge for wafer with standard CMP; (c) Cross-TEM images taken at the waveguide edge for wafer with extra-CMP module; (d) Top-down image of 300 mm wafer with 150-nm graphene transferred at the center; (e) Representative top-down SEM image of wafer with short soaking time; (f) Representative top-down SEM image of wafer with long soaking time; (g) Cross-section device scheme and description of the study on graphene contact; (h) Cross-section TEM of final device

南京电子器件研究所的石墨烯器件研究团队对石墨烯的调制效率以及可实现的通信速率非常关注。近期该团队和东南大学合作,成功将 Au 膜转移和腐蚀对准方法应用到电光调制器的制备工艺中,解决了界面态过大以及串联寄生等问题,分别实现了基于热光学和电吸收效应的石墨烯-硅集成调制器^[29]。如图 11 所示,该项研究展示该制备技术具有普适性,其中热光调制器的调制效率为

0.037 nm/mW , 仅 $7.54 \mu\text{m}^2$ 的面积即达到 $67.4 \text{ K}\cdot\mu\text{m}^3/\text{mW}$ 加热性能,同时制备的石墨烯/氧化铝/石墨烯电吸收调制器实现了数据速率 56 Gb/s , 功耗仅为 0.2 pJ/bit ^[29]。利用这种方法,该团队近期还制备了石墨烯马赫-曾德尔调制器(MZM),实现了幅度和相位的双重调制,工作带宽达到 42 GHz , 可为前述石墨烯和化合物的单片集成提供更多的技术参考。

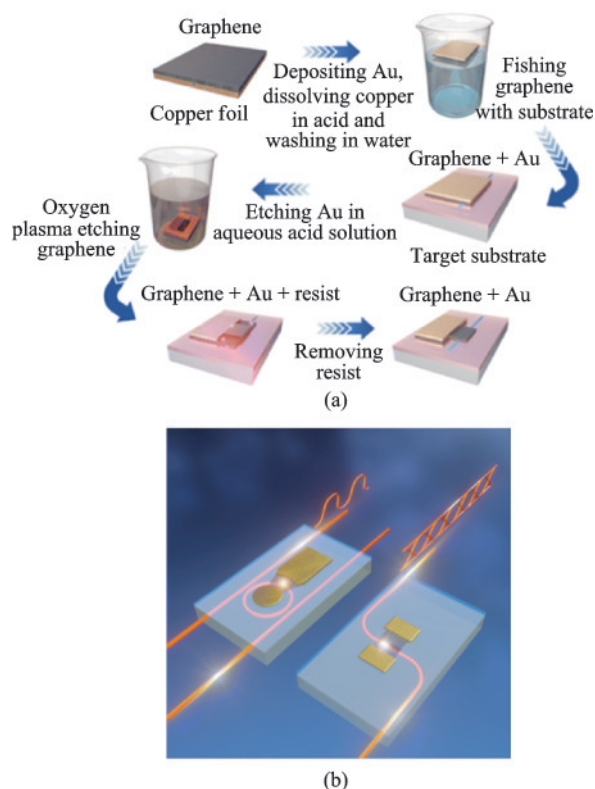


图11 Au膜转移法制备石墨烯光电调制器^[29]: (a) 制备过程; (b) 石墨烯器件对光的调制示意图

Fig.11 Graphene electro-optical modulators prepared by Au film transfer^[29]: (a) Preparation process; (b) Schematic diagram of graphene devices for light modulation

目前,虽然石墨烯调制器已展示出明显的小尺寸特性,但就消光比、带宽、插入损耗等综合性能而言,与较常用材料铌酸锂仍有一定差距,主要原因在于机械剥离的石墨烯面积过小,无法充分发挥其调制效率的优势实现大的消光比,而石墨烯在CVD制备过程中引入的非本征掺杂以及工艺过程中引入的界面电掺杂,均会导致石墨烯在电调费米能级时电光系数可调幅度降低,并引入额外的插入损耗,这些问题需要在后期进行专项研究。

4 结束语

石墨烯具有优异的光电性能以及独特的转移集成特性,是发展光电集成技术的理想材料之一。近年来,基于石墨烯的光电器件取得了飞速的发展,光电探测器已证明远超化合物的带宽以及可比拟的响应度、饱和功率、线性度等性能,具有极小有源面积的石墨烯光电调制器近年在带宽、消光比等方面取得较快进展,并通过了300 mm晶圆CMOS工艺的验证,这些研究成果为石墨烯融入传统光电

集成技术体系提供了可行的技术方案,也为发展独特的碳基单片光电集成技术奠定了基础。当然,目前石墨烯各项光电器件性能同理论值仍有较大差距,如何实现兼具低暗电流和高输出功率的光电探测器,如何进一步降低电光调制器的插入损耗等问题是仍需重点攻关的技术难题,这些问题需要材料制备、转移技术以及器件集成方法等方面的联合攻关。在材料方面,需要进一步提高CVD石墨烯的迁移率(至少 $>10\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)以提高带宽潜力 $[1/(2\pi RC)]$,还得进一步降低材料的载流子浓度($<10^{12}\text{ cm}^{-2}$)以降低光在器件的无效吸收;在转移技术方面,一方面需要大面积无损转移技术的开发,另一方面对晶圆中一些局部高低不平的区域则希望通过(可编辑形状)微区图章转印完成转移,如此才能将石墨烯高效放置于所需位置;最后在器件方面,不仅需要低界面态、高耐压电介质提高器件调控范围,还需结合单片集成需求开发匹配输入输出,如从激光器的输出功率和微波放大的输入功率来推演光电调制器、探测器的输入和输出,实现一体化设计和集成技术开发。

参 考 文 献

- [1] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip [J]. Nature, 2018, 556: 349-354.
- [2] Wang Z C, Tian B, Pantouvaki M, et al. Room-temperature InP distributed feedback laser array directly grown on silicon [J]. Nature Photonics, 2015, 9: 837-842.
- [3] Siva Y, Dave K, Plant J J, et al. Integrated microwave photonic subsystems[J]. 2021 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAP-ID). Miramar Beach, FL, USA: IEEE, 2021: 1-2.
- [4] Marco R, Vito S, Michele M, et al. Graphene-based integrated photonics for next-generation datacom and telecom[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 392-414.
- [5] Koepfli S M, Michael B, Yesim K, et al. Metamaterial graphene photodetector with bandwidth exceeding 500 gigahertz [J], Science, 2023, 380 (6650): 1169-1174.
- [6] Ding J F, Ji R Q, Zhang L, et al. Electro-optical response analysis of a 40 Gb/s silicon Mach-Zehnder optical modulator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2434-2440.
- [7] Xiong C, Gill D M, Proesel J E, et al. Monolithic 56 Gb/s silicon photonic pulse amplitude modulation

- transmitter[J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1060-1065.
- [8] Azadeh S S, Merget F, Romero-García S, et al. Low V_{π} silicon photonics modulators with highly linear epitaxially grown phase shifters[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23526-23550.
- [9] Juodawlkis P W, O'Donnell F J, Bailey R J, et al. In-GaAsP/InP quantum-well electro refractive modulators with sub-volt V_{π} [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5435: 53-63.
- [10] Gupta Y D, Binet G, Diels W, et al. Highest performance open access modulators on InP platform [C]. 2022 European Conference on Optical Communication. Basel, Switzerland: IEEE, 2022: 1-3.
- [11] Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1547-1555.
- [12] Li M X, Ling J W, He Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4123.
- [13] Soriano V, Midrio M, Romagnoli M, et al. Design optimization of single and double layer graphene phase modulators in SOI[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6478-6490.
- [14] Soriano V, Angelis G D, Cassese T, et al. Complex effective index in graphene-silicon waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29984-29993.
- [15] Satterthwaite P F, Zhu W C, Jastrzebska-Perfect P, et al. Van der Waals device integration beyond the limits of van der Waals forces using adhesive matrix transfer [J]. *Nature Electronics*. 2024, 7(1): 17-28.
- [16] Kong L G, Wu R X, Chen Y, et al. Wafer-scale and universal van der Waals metal semiconductor contact [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1014.
- [17] Chen M Y, Xie Y Q, Cheng B, et al. Selective and quasi-continuous switching of ferroelectric Chern insulator devices for neuromorphic computing[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19: 962-969.
- [18] Yang Y K, Liang S J, Miao F. Pixel-correlated computing for detecting and tracking targets in dim lighting [J]. *Nature Electronics*, 2024, 7: 191-192.
- [19] Guo Y M, Li J X, Zhan X P, et al. Van der Waals polarity-engineered 3D integration of 2D complementary logic[J]. *Nature*, 2024, 630: 346-352.
- [20] Lu D L, Chen Y, Lu Z Y, et al. Monolithic three-dimensional tier-by-tier integration via van der Waals lamination[J]. *Nature*, 2024, 630: 340-345.
- [21] Muench J E, Ruocco A, Giambra M A, et al. Waveguide-integrated, plasmonic enhanced graphene photo-detectors[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(11): 7632-7644.
- [22] Wang Y L, Li X, Jiang Z B. Ultrahigh-speed graphene-based optical coherent receiver[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5076.
- [23] Wu Q C, Qian J, Wang Y C. Waveguide-integrated twisted bilayer graphene photodetectors[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 3688.
- [24] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474: 64-67.
- [25] Phare C T, Lee Y D, Cardenas J, et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 511-514.
- [26] Dalir H, Xia Y, Wang Y, et al. Athermal broadband graphene optical modulator with 35 GHz speed[J]. *ACS Photonics*, 2016, 9: 1564-1568.
- [27] Hitesh A, Bernat T, Lorenzo O, et al. 2D-3D integration of hexagonal boron nitride and a high-k dielectric for ultrafast graphene-based electro-absorption modulators[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1070.
- [28] Wu C H, Brems S, Yudistira D, et al. Wafer-scale integration of single layer graphene electro-absorption modulators in a 300 mm CMOS pilot line[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(6): 2200789.
- [29] Wu X X, Cao Z Y, Zhao T X, et al. High efficiency graphene-silicon hybrid-integrated thermal and electro-optical modulators[J]. *Nanoscale Horizons*, 2024(8): 1372-1378.



吴云 (Wu Yun) 男, 1983 年出生, 湖北孝感人, 2012 年毕业于武汉大学物理学院, 获得博士学位, 正高级工程师, 主要从事石墨烯射频、太赫兹及光电器件的研发工作。