

石墨烯-硅基混合光子集成电路

肖廷辉 于洋 李志远

Graphene-silicon hybrid photonic integrated circuits

Xiao Ting-Hui Yu Yang Li Zhi-Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 217802 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.217802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.217802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯涂覆空心光纤电光调制特性的研究

[Study on the electro-optic modulation properties of graphene-coated hollow optical fiber](#)

物理学报.2016, 65(4): 047801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.047801>

全新的电导率特征矩阵方法及其在石墨烯 THz 频率光学特性上的应用

[A new characteristics matrix method based on conductivity and its application in the optical properties of graphene in THz frequency range](#)

物理学报.2015, 64(5): 057801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.057801>

双层石墨烯位于 1800--2150  $\text{cm}^{-1}$  频率范围内的和频拉曼模

[The second-order combination Raman modes of bilayer graphene in the range of 1800-2150  \$\text{cm}^{-1}\$](#)

物理学报.2014, 63(14): 147802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.147802>

掺杂石墨烯系统电场调控的非线性太赫兹光学特性研究

[Electrically-controlled nonlinear terahertz optical properties of graphene](#)

物理学报.2013, 62(23): 237804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237804>

基于倏逝场耦合的石墨烯波导光传输相位特性仿真与实验研究

[Simulation and experimental research of phase transmission features based on evanescent field coupled graphene waveguide](#)

物理学报.2013, 62(23): 237805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237805>

专题: 与硅技术融合的石墨烯类材料及其器件研究

## 石墨烯-硅基混合光子集成电路\*

肖廷辉<sup>1) #</sup> 于洋<sup>1) 2) #</sup> 李志远<sup>3) 1) †</sup>

1) (中国科学院物理研究所光物理实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (华南理工大学物理与光电学院, 广州 510640)

(2017年6月27日收到; 2017年7月31日收到修改稿)

近年来硅基光子学已经慢慢走向成熟, 它被认为是未来取代电子集成电路, 实现下一代更高性能的光子集成电路的关键技术. 这得益于硅基光子器件与现代的互补金属氧化物半导体工艺相兼容, 能够实现廉价的大规模集成. 然而, 由于受硅材料本身的光电特性所限, 在硅基平台上实现高性能的有源器件仍然存在着巨大挑战. 石墨烯-硅基混合光子集成电路的发展为解决这一问题提供了可行的方案. 这得益于石墨烯作为一种兼具高载流子迁移率、高电光系数和宽带吸收等优点的二维光电材料, 能够方便地与现有硅基器件相集成, 并充分发挥自身的光电性能优势. 本文结合我们课题组在该领域研究的一些最新成果, 介绍了国际上在石墨烯-硅基混合光子集成电路上的一些重要研究进展, 涵盖了光源、光波导、光调制器和光探测器四个重要组成部分.

**关键词:** 硅基光子学, 石墨烯光子学, 集成光子学**PACS:** 78.67.Wj, 85.30.-z, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.66.217802

## 1 引言

自2004年首次在实验中通过机械剥离的方法制备成功后, 石墨烯作为一种兼具高载流子迁移率、高机械强度以及高热导率等优越性质的二维材料, 一直受到科学界和工业界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 基于石墨烯的研究与应用涵盖了物理、化学、生物医学、材料科学和工程技术等方方面面. 其中, 作为一种优秀的光电材料, 石墨烯被认为将极大地促进光电子技术的发展. 与传统的半导体光电材料相比, 石墨烯具有很多优点<sup>[4]</sup>. 首先, 石墨烯具有更高的载流子迁移率, 其高达 $10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的载流子迁移率在高速高频光电器件方面具有重要应用潜力. 其次, 石墨烯在可见和红外波段具有恒定的2.3%的宽带吸收, 可用于实现宽带光电器件. 另

外, 单原子层的石墨烯还具有更加敏感的光电响应, 人们可通过化学掺杂、外加栅压和光抽运的方法改变石墨烯费米能级, 从而控制石墨烯内的载流子浓度和光学跃迁<sup>[5]</sup>. 石墨烯在光电方面的这些优点, 为实现高性能光电器件提供了新的可能.

与此同时, 硅基光子学在近年来已慢慢走向成熟, 它被认为是未来取代电子集成电路、实现下一代光子集成电路的关键技术<sup>[6,7]</sup>. 这得益于其与现代的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺相兼容, 能够实现廉价的大规模集成, 并为未来高速宽带通信系统和数据互连提供了可实用的方案. 随着硅基光子学在近年来的不断发展, 宽带低损耗的波导和一些无源器件<sup>[8-10]</sup>, 如分束器、耦合器等已经日渐成熟, 并已开始走向商用. 但对于实现光子集成电路中一些不可或缺的有源器件, 如片上光源、调制器、探测器等, 仍然存在着许多问题和挑战. 这

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB632704)和国家自然科学基金(批准号: 11434017)资助的课题.

# 共同第一作者.

† 通信作者. E-mail: phzyli@scut.edu.cn

主要源于硅是一种间接带隙半导体, 且其光电系数和非线性系数较小. 人们为解决这些问题, 将 III-V 族半导体或锗作为有源材料引入无源的硅器件中<sup>[11]</sup>. 然而这些材料高昂的价格以及与硅材料集成上的一些技术问题, 阻碍了它们的商业化与大规模集成.

石墨烯的出现为以上问题的解决、实现高性能的光电器件提供了新的可能<sup>[12]</sup>. 随着合成制备工艺的发展, 由单层碳原子组成的石墨烯与传统的 III-V 族半导体或锗相比, 具有明显的价格优势. 其次, 由于石墨烯本身所具有的二维材料特性, 能够方便地集成在现有的硅基器件上, 且与现有硅基工艺相兼容. 更为重要的是, 石墨烯本身所具有的优越的光电特性, 可以作为有源材料大大提升现有器件的性能. 因而, 近几年石墨烯与硅基相结合的混合光子集成器件得到了前所未有的发展, 这些器件所组成的石墨烯-硅基混合光子集成电路, 为突破现有硅基光子集成电路的瓶颈, 实现下一代高速高密度数据密度的光通信和信息互联注入了新的活力.

本文结合我们课题组最近的研究成果, 综述国际上在石墨烯-硅基混合光子集成电路上的一些重要的最新进展, 内容涵盖了光子集成电路中最重要的几个组成部分, 包括光源、波导、调制器和探测器.

## 2 石墨烯-硅基混合集成光源

片上集成光源是实现片上光通信、产生光通信载体的源头. 但由于硅是一种间接带隙半导体, 辐射跃迁概率极低, 无法像直接带隙半导体通过电注入的方式增加辐射跃迁产生光子, 形成所需的光源, 因而在硅材料中实现电抽运的集成光源一直是一个巨大的挑战. 通过引入 III-V 族半导体材料虽然能够从某种程度上解决这一问题, 但存在着价格

昂贵和集成困难等问题. 石墨烯本身作为一种无带隙的材料, 载流子主要通过较快的电子-电子和电子-声子相互作用过程弛豫, 而非通过较慢的辐射跃迁过程, 因而, 石墨烯本身作为辐射跃迁的载体形成所需光源也并非易事. 近两年, 石墨烯-硅基混合集成光源开始崭露头角, 为实现廉价、可大规模生产且与 CMOS 工艺相兼容的片上集成光源开辟了新的道路. 这些混合集成光源主要通过石墨烯内热载流子的热辐射来实现<sup>[13-15]</sup>, 并通过硅基结构对辐射波长进行有效调控.

2015年, 哥伦比亚大学的 Kim 等<sup>[16]</sup>通过外加电流偏置的方法, 实现了石墨烯内部电子和声子温度的去耦合, 并将石墨烯内部空间局域的热电子加热到 2800 K, 从而产生了从可见到近红外波段的热辐射, 并利用硅基结构的干涉效应, 对辐射光谱进行了调节. 实验中所采用的器件结构如图 1(a) 所示, 当源极和漏极之间的电压加至 2.90 V 时, 可以观测到人眼可分辨的可见发光, 如图 1(b) 所示. 此外, 他们充分利用了混合集成结构的特性, 通过改变悬空的石墨烯和硅衬底之间的距离, 实现了对辐射光谱的有效调节. 硅基结构对辐射光谱的调节原理示意图如图 2(a) 所示. 石墨烯热载流子产生的热辐射会向自由空间和硅衬底两个不同方向发生辐射, 向硅衬底方向发生的热辐射会受到衬底的反射而与直接从石墨烯中产生的热辐射发生干涉, 图 2(a) 中的红色区域所示的是由于干涉相长导致的辐射光强增强. 由于干涉效应, 不同沟道深度对于热辐射光谱具有调节作用, 其模拟结果如图 2(b) 和图 2(c) 所示. 可以看出, 对于同样的光谱范围, 随着沟道深度的增加, 两个相邻干涉增强的波长间距逐渐减小. 这一调制可类比法布里-珀罗腔的纵模间距随腔长的变化.

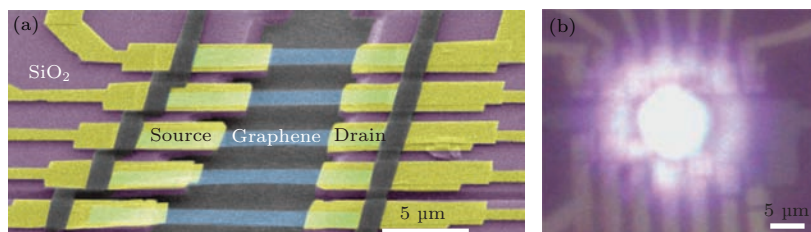


图 1 (a) 石墨烯热辐射光源器件的赝色扫描电子显微镜图; (b) 石墨烯热辐射器件发光时的光学显微镜图<sup>[16]</sup>  
Fig. 1. (a) Fake-color scanning electron microscopy image of a graphene-based thermal emitter; (b) optical microscopy image of light emission from a graphene-based thermal emitter<sup>[16]</sup>.

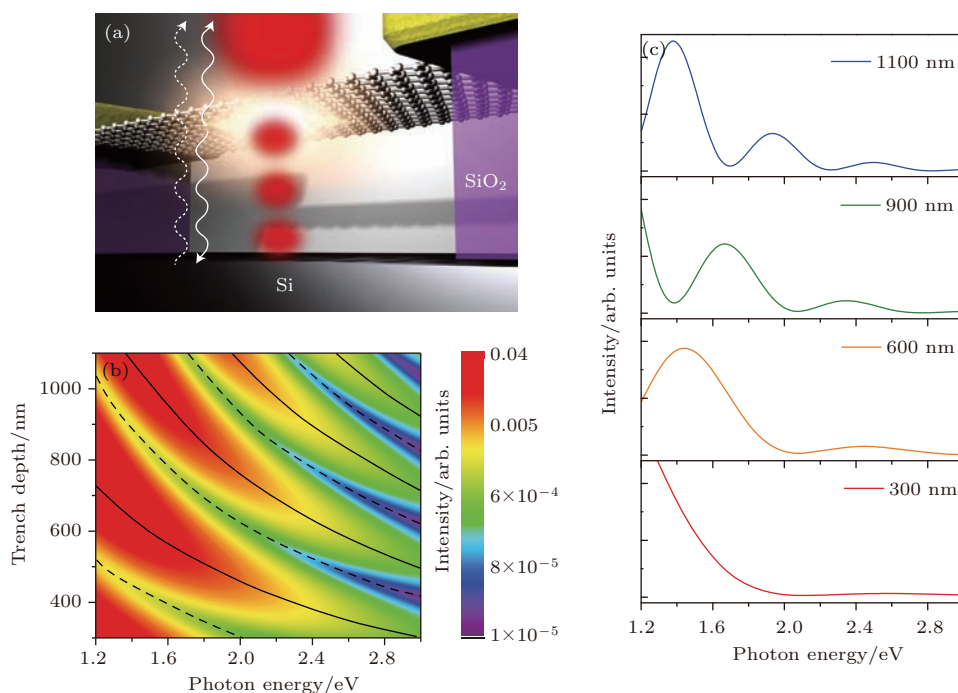


图2 (a) 集成硅基结构对热辐射光源的光谱调节示意图; (b) 热辐射强度随沟道深度和光子能量的分布; (c) 不同沟道深度的热辐射光谱<sup>[16]</sup>

Fig. 2. (a) Schematic of tuning the thermal emission spectrum by an integrated silicon structure; (b) thermal emission intensity as a function of the trench depth and photon energy; (c) thermal emission spectra of the thermal emitter with different trench depths<sup>[16]</sup>.

2016年, 麻省理工学院的 Englund 小组<sup>[17]</sup> 利用石墨烯-硅基光子晶体微腔结构实现了电驱动的片上热辐射光源. 他们同样使用外加偏置电压的方法, 通过在石墨烯内部产生热载流子的方式来产生热辐射. 热辐射受到硅基光子晶体微腔的调制, 在腔的共振波长处产生了增强的窄带辐射峰, 且具有很强的偏振依赖性. 他们的工作实现了对片上热辐射光源的光谱和偏振控制. 通过在源漏电极间加入不同的偏置电压, 他们观测到了热辐射峰的移动. 这些辐射峰对应于光子晶体微腔不同模式的共振波长, 说明在不同偏压下, 器件的热辐射波长发生了移动. 此外, 他们还测量了不同偏振条件下的热辐射强度, 证明了受到硅基光子晶体微腔调制的热辐射具有偏振依赖性.

石墨烯-硅基混合集成光源虽然为实现廉价且可大规模生产的片上集成光源提供了新的思路, 但仍然存在许多问题和挑战. 利用热辐射的光源存在电光能量转换效率低、局域温度高而影响集成环境等问题; 与通信质量密切相关的光束质量和相干性等方面也需要进一步的研究和完善. 当然, 通过引入其他物理过程和机制而实现的光学辐射仍有待

人们进一步的研究和探索, 比如利用石墨烯内的热电子产生表面等离激元的光源<sup>[18]</sup>, 由石墨烯的非线性效应产生高次谐波<sup>[19,20]</sup>, 以及利用石墨烯量子点的光致发光等<sup>[21]</sup>. 值得注意的是, 相比于光产生光的非线性过程, 电产生光的过程更能够从根本上解决片上光源问题.

### 3 石墨烯-硅基混合集成光波导

光波导作为片上光通信各器件连接和信息互联的通道, 看似简单却起着举足轻重的作用. 随着近年来硅基光子学的发展与制备工艺的不断完善, 实现低损耗的硅基波导已并非难事. 而将石墨烯作为有源层与硅基波导相集成, 大大扩展了波导器件的功能. 一方面, 石墨烯作为有源层为波导的主动调制提供了可能. 另一方面, 硅基波导增加了光与石墨烯的相互作用长度, 从而增强了石墨烯的光吸收和非线性效应.

2011年, 加州大学伯克利分校的 Zhang 研究组<sup>[22]</sup> 首先提出了石墨烯-硅基混合集成光波导的结构. 该结构在宽带光调制器上的成功应用, 立即

引起了相关研究者的广泛关注. 2012年, 明尼苏达大学的Li研究组<sup>[23]</sup>首先对石墨烯-硅基混合集成波导的吸收损耗进行了细致的研究. 研究发现, 相比于垂直照射情况下的石墨烯仅有的2.3%的吸收, 当石墨烯集成在硅基波导表面形成混合波导结构时, 其吸收损耗可达为0.2 dB/ $\mu\text{m}$ , 即在50  $\mu\text{m}$ 的相互作用长度即可达到10 dB的吸收损耗, 相当于实现了90%的光吸收. 石墨烯吸收的增强大大增加了石墨烯的光电转换效率. 图3(a)和图3(b)所示分别为两种不同光与石墨烯相互作用的示意图. 图3(c)所示为石墨烯-硅基混合波导的TE基横模的强度分布, 从图3(c)可以看出, 石墨烯与硅基波导的模式主要是通过倏逝波进行相互作用. 2014年, 香港中文大学的Tsang课题组<sup>[24]</sup>对石墨烯-硅基混合集成波导中的自由载流子吸收的动力学过程进行了进一步的研究, 图4所示为抽运探测的实验结果, 研究表明, 载流子注入引起波导损耗增加的上升时间与自由载流子复合使波导损耗恢复的下降时间都是几个微秒, 与硅材料的载流子寿命在同一量级, 据此提出了石墨烯产生的载流子注入硅波导的效应.

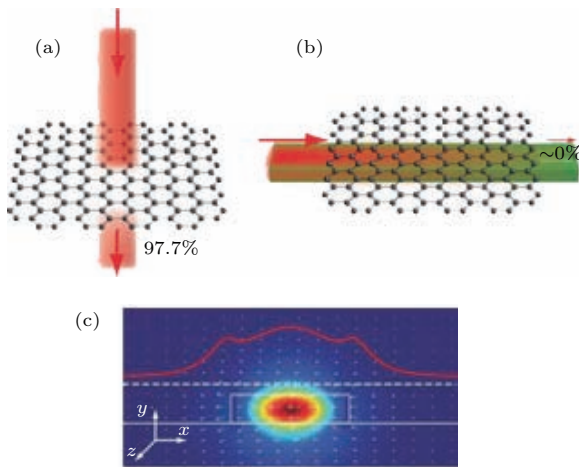


图3 (a) 垂直入射时石墨烯光吸收示意图; (b) 与波导集成时石墨烯光吸收示意图; (c) 石墨烯-硅基混合波导的TE基横模<sup>[23]</sup>

Fig. 3. (a) Schematic of graphene absorption for normal incident light; (b) schematic of waveguide-integrated graphene absorption; (c) fundamental TE mode of a graphene-silicon hybrid waveguide<sup>[23]</sup>.

除了对混合波导中光吸收的研究外, 2015年, 国防科技大学的Liu等<sup>[25]</sup>对于石墨烯-硅基混合集成波导的非线性效应进行了研究. 研究表明, 当飞秒脉冲耦合入波导, 由于石墨烯极大的克尔非线性系数, 将产生由自相位调制导致的明显的频谱展宽, 如图5(a)和图5(b)所示. 同年, 浙江大学的Dai研究组<sup>[26]</sup>根据石墨烯表面等离激元对电磁场的极强的局域特性, 提出了硅上集成的石墨烯表面等离激元纳米波导. 最近, 东京大学的Goda研究组<sup>[27]</sup>提出了利用狭缝硅基波导结构激发石墨烯表面等离激元的设计, 并研究了产生的表面等离激元对波导传输的调制作用. 混合集成波导结构示意图如图6(a)所示, 整个器件设计在绝缘体上硅的晶片上, 器件下方的绝缘层被氢氟酸去除, 使器件形成空气桥式的结构, 从而将器件的工作波长延伸至中红外波段. 石墨烯覆盖在狭缝宽度为80 nm的狭缝波导上, 其费米能级可以通过金属电极进行调节. 波导的两端分别与两个亚波长光栅耦合器相连, 通过它们, 入射光和出射光可以分别由两根光

性系数, 将产生由自相位调制导致的明显的频谱展宽, 如图5(a)和图5(b)所示. 同年, 浙江大学的Dai研究组<sup>[26]</sup>根据石墨烯表面等离激元对电磁场的极强的局域特性, 提出了硅上集成的石墨烯表面等离激元纳米波导. 最近, 东京大学的Goda研究组<sup>[27]</sup>提出了利用狭缝硅基波导结构激发石墨烯表面等离激元的设计, 并研究了产生的表面等离激元对波导传输的调制作用. 混合集成波导结构示意图如图6(a)所示, 整个器件设计在绝缘体上硅的晶片上, 器件下方的绝缘层被氢氟酸去除, 使器件形成空气桥式的结构, 从而将器件的工作波长延伸至中红外波段. 石墨烯覆盖在狭缝宽度为80 nm的狭缝波导上, 其费米能级可以通过金属电极进行调节. 波导的两端分别与两个亚波长光栅耦合器相连, 通过它们, 入射光和出射光可以分别由两根光

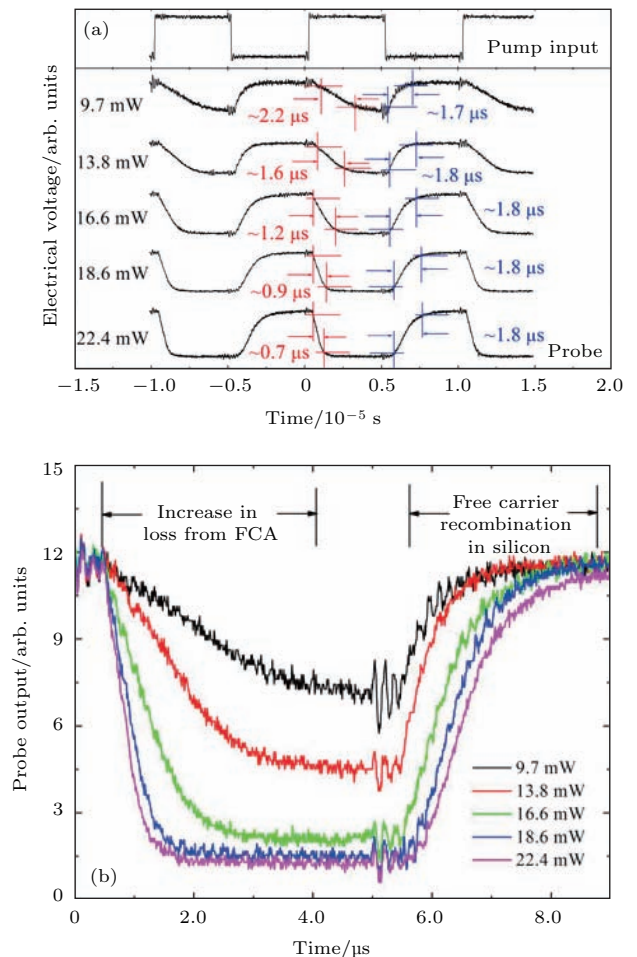


图4 (a) 石墨烯-硅基混合波导中, 不同功率的抽运光对探测光的调制; (b) 探测光信号的瞬态响应过程<sup>[24]</sup>

Fig. 4. (a) Modulation of probe light by pump light with different powers in a graphene-silicon hybrid waveguide; (b) temporal response process of the probe light<sup>[24]</sup>.

纤耦合入和耦合出器件. 石墨烯的表面等离子激元通过狭缝的散射被激发. 表面等离子激元对波导的调制结果如图 6 (b) 所示, 由于所激发的表面等离子激元波长与费米能级相关, 因而在不同费米能级下, 由

狭缝两侧所激发的表面等离子激元产生干涉相长或相消的结果. 这影响了波导模式的分布, 从而影响了石墨烯的吸收, 使得混合波导的传输损耗随费米能级呈现出了周期性的调制.

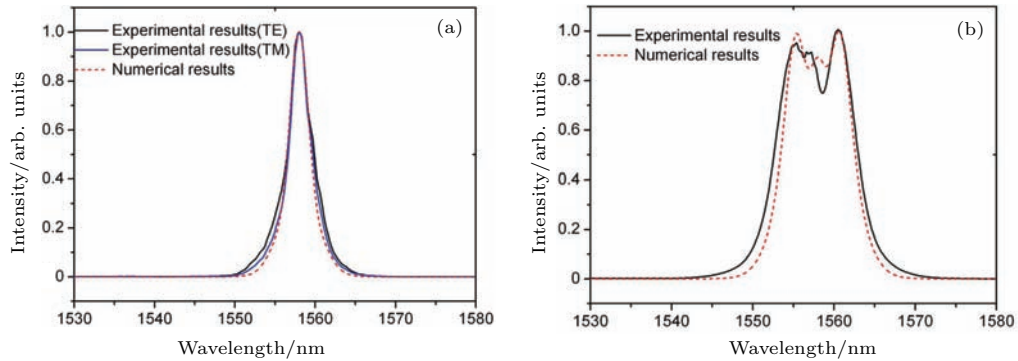


图 5 (a) 飞秒激光入射时, 硅基波导的透射谱; (b) 同样的飞秒激光入射时, 石墨烯-硅基混合波导透射谱由于自相位调制发生展宽 [25]

Fig. 5. (a) Transmission spectrum of a silicon waveguide with a femtosecond laser input; (b) broadening of the transmission spectrum of a graphene-silicon hybrid waveguide with a femtosecond laser input [25].

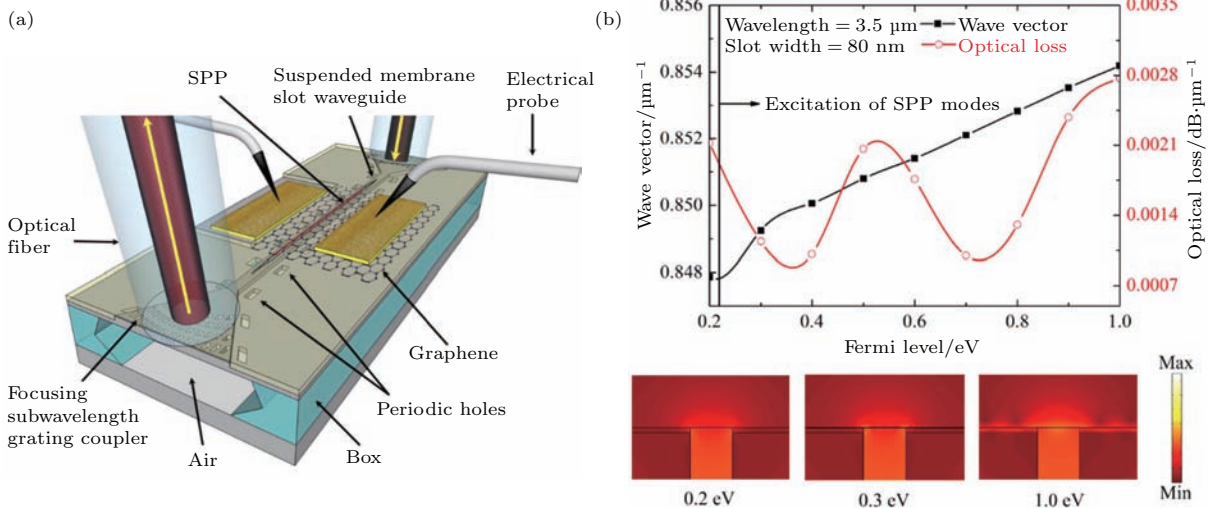


图 6 (a) 石墨烯-硅基混合狭缝波导示意图; (b) 不同费米能级所激发的石墨烯表面等离子激元对波导模式系数的调制 [27]

Fig. 6. (a) Schematic of a graphene-silicon hybrid slot waveguide; (b) modulation of the waveguide mode index by excited graphene surface plasmons at different Fermi levels [27].

石墨烯-硅基混合集成波导利用石墨烯作为有源层, 打破了原本硅基波导只能作为低损耗的被动器件实现器件间互连的单一功能, 实现了主动调制的波导传输模式, 并能够利用波导中光与石墨烯的长距离相互作用, 充分挖掘石墨烯的光电性质及其非线性效应. 对于石墨烯-硅基混合集成波导中的一些重要物理过程, 如光吸收 [28-30]、非线性效应 [31-33] 和表面等离子激元 [34-36] 等的深入研究, 为实现石墨烯-硅基混合集成平台中的各种有源器件

打下了坚实的基础. 虽然近年来关于石墨烯-硅基混合集成波导的研究已经较为全面, 但作为实现其他有源器件的基础, 实现更强的石墨烯与波导模相互作用仍然具有重要的应用前景, 基于石墨烯的优化波导结构的设计, 如狭缝波导、慢光光子晶体波导等 [37], 新的内部物理机制的引入和调控, 如表面等离子激元的激发和石墨烯-硅波导异质结内的载流子控制等 [38], 都有助于未来实现高效、高可控性的石墨烯-硅基混合集成波导.

### 4 石墨烯-硅基混合集成光调制器

光调制器作为光通信系统中对光信号处理的最基本器件,对通信质量、速度和带宽起着决定性的作用.现阶段,在硅基平台上实现高性能的调制器,仍然存在着一些问题.其中一个最主要的原因在于硅材料本身较小的电光系数.石墨烯-硅基混合集成调制器的出现,弥补了这一缺点,并带来了许多新的优势.首先,石墨烯具有极大的电光系数,这意味着在相同的调制电压下,调制器的调制深度可以做得更大.其次,由于狄拉克费米子的高频电导是一个常数,石墨烯具有可覆盖通信波段到中红外的宽带恒定的光吸收系数,可用于实现宽带的调制器.另外,石墨烯极高的载流子迁移率,可以大大提高调制器的调制速度.石墨烯光生载流子的产生和弛豫时间在皮秒量级,理论上调制器的调制频率可以做到几百 GHz,比实验上所能实现的最快硅基调制器快10倍以上.

2011年,加州大学伯克利分校的Zhang课题组[22]在实验上实现了第一个石墨烯-硅基混合集成光调制器,其结构如图7(a)所示.通过主动调节单层石墨烯的费米能级来调节石墨烯的吸收,实现了GHz的调制速度,以及0.1 dB/ $\mu\text{m}$ 的强度调制深度.由于该调制器的石墨烯-硅基波导混合集成结构,充分利用了波导与石墨烯吸收的宽带特性,该器件可工作在1.35—1.6  $\mu\text{m}$ 的宽带范围内.图7(b)所示为不同调制电压下调制器的调制深度测量结果,不同的调制电压被分成了三个不同的调制电压区域,分别对应了石墨烯费米能级和入射光子能量的三种不同关系.在中间的调制电压区域,石墨烯的费米能级靠近狄拉克点,石墨烯内的电子可以通过带间跃迁的方式吸收光子,吸收较强,调制深度较大.而在左侧的调制电压区域,由于石墨烯费米能级低于光子能量的一半,因而入射光的能量不足以激发电子实现带间跃迁,因而吸收较弱,调制深度也较弱.对于右侧的调制电压区域,由于费米能级过高,与入射光子能量相对应的电子态都已经被电子占满,带间跃迁被禁止,因而吸收也较弱,调制深度也较弱.该调制器通过改变石墨烯的费米能级而控制电子在能带的填充情况,实现了对石墨烯内的光学跃迁和吸收的调制,进而实现对硅基波导内光强的调制.

然而基于波导结构的石墨烯-硅基混合集成光调制器的尺寸通常会比较大,因为波导中的光需要经过足够长的传播距离才能达到所需的调制深度.为解决这一问题,2013年,加州大学伯克利分校的Wang课题组[39]将石墨烯集成在硅基光子晶体微腔上的结构来实现光调制.该结构极大地增强了光与石墨烯的相互作用,减小了光调制器的尺寸.器件结构示意图和电镜图如图8所示.为了能在较大地范围内调节石墨烯的费米能级,该器件使用的是离子凝胶栅极来调制石墨烯的费米能级,但由于离子在电场的作用下响应较慢,调制器的调制速度受到了极大的限制.2014年,莱斯大学的Xu课题组[40]提出了更高调制效率的石墨烯-硅基微环谐

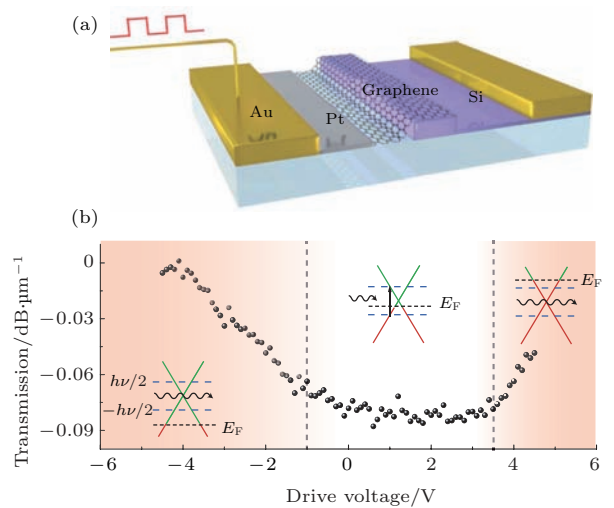


图7 (a) 石墨烯-硅基混合宽带光调制器示意图; (b) 光调制器在不同调制电压下的调制深度[22]  
 Fig. 7. (a) Schematic of a broadband graphene-silicon hybrid optical modulator; (b) modulation depth of the optical modulator at various drive voltages [22].

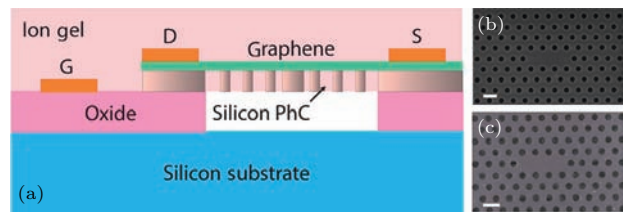


图8 (a) 电调制石墨烯-硅基混合光子晶体微腔; (b) 硅基光子晶体微腔扫描电子显微镜图; (c) 石墨烯-硅基混合光子晶体微腔扫描电子显微镜图[39]  
 Fig. 8. (a) Schematic of an electrically modulated graphene-silicon hybrid photonic crystal cavity; (b) scanning electron microscopy image of a silicon photonic crystal cavity; (c) scanning electron microscopy image of a graphene-silicon hybrid photonic crystal cavity [39].

振腔混合集成光调制器, 其结构示意图如图 9(a) 所示. 由于微环谐振腔极高的  $Q$  值, 谐振腔内的光与石墨烯的相互作用被大大增强, 电调制导致的石墨烯吸收率的微小变化都会被放大, 因而, 该调制器具有极高的调制效率. 如图 9(b) 所示, 他们在实验中实现了 40% 的调制深度. 2015 年, 丹麦技术大学的 Mortensen 研究组 [41] 对影响石墨烯-硅基微环谐振腔混合集成光调制器中调制深度的因素进行了更为细致的研究, 给出了石墨烯在微环腔上不同的包覆长度对调制深度的影响. 他们在实验中分别研究了四分之一、二分之一和四分之三微环包覆

长度的调制器的调制深度. 石墨烯-硅基微环光调制器的调制深度由微环的临界耦合条件所决定, 而在他们所设计的微环调制器中, 四分之一石墨烯包覆长度的微环调制器与临界耦合条件更为接近, 因而在  $-8.8$  V 的较小电压偏置下即可实现 12.5 dB 的调制深度. 而较长包覆长度的调制器的调制深度较低, 二分之一石墨烯包覆长度的微环调制器在  $-12.5$  V 的较高调制电压偏置下只能实现 6.2 dB 的调制深度. 此外, 较长石墨烯包覆还会带来较大的吸收损耗, 使得微环腔的  $Q$  值降低, 调制器的带宽增大.

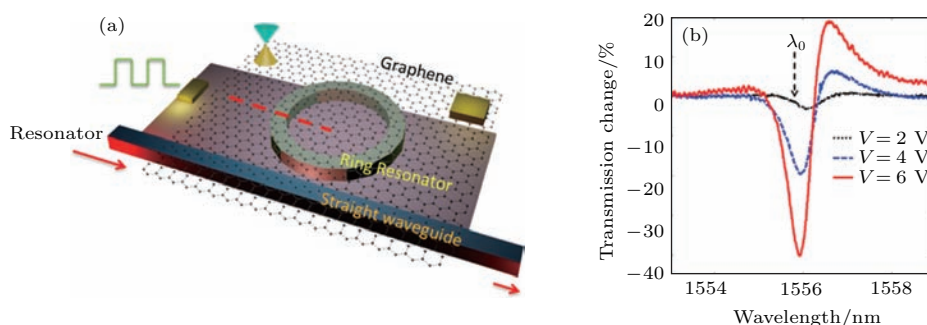


图 9 (a) 石墨烯-硅基混合微环谐振腔光调制器示意图; (b) 光调制器在不同调制电压下的调制深度 [40]

Fig. 9. (a) Schematic of a graphene-silicon hybrid microring-cavity optical modulator; (b) modulation depth of the optical modulator at various drive voltages [40].

以上的工作都是电调制光的石墨烯-硅基混合集成光调制器. 我们课题组在 2015 年在实验上实现了第一个石墨烯-硅基光子晶体微腔的全光调制 [42]. 与电调制的调制器相比, 全光调制的器件工艺更为简单, 制备成本更低. 而且由于器件不需要金属电极, 降低了器件的热损耗, 使得集成器件的局域温度环境更加稳定. 图 10(a) 和图 10(b) 为我们实验中所用的器件和全光调制测量系统示意图, 图 10(c) 为器件的扫描电子显微镜图. 实验中使用了一束波长为 1064 nm 的抽运光来调制石墨烯的费米能级, 随着抽运光功率的逐渐增加, 自由载流子吸收产生的热光效应使得硅的折射率发生了改变, 因而微腔的共振波长发生了红移, 如图 10(d) 所示. 此外, 微腔的  $Q$  值经历了先下降后上升的过程, 如图 10(e) 所示, 这是由石墨烯的饱和吸收与硅的自由载流子吸收的竞争所导致的. 当抽运光功率较弱时, 随着光功率的增强, 由石墨烯产生的光吸收降低较慢, 而由自由载流子产生的光吸收上升较快, 因而器件的光吸收上升占据了主导作用, 微

腔的  $Q$  值出现了降低. 而随着抽运光功率的持续增大, 石墨烯最终达到了饱和吸收态, 使得随功率增加导致的石墨烯光吸收降低快于自由载流子吸收产生的光吸收上升, 因而器件总的光吸收在较高的抽运光功率范围随抽运光强增大而降低, 导致  $Q$  值升高. 我们还通过对照实验证明, 在没有石墨烯的条件下, 无法实现对微腔共振波长和  $Q$  值同样强度的调制. 我们的全光石墨烯-硅基混合集成微腔最终实现了对微腔  $Q$  值 20% 深度的调制. 然而, 现阶段石墨烯-硅基混合集成全光调制的研究仍然处于初级阶段, 距离其实际应用仍有许多问题需要解决, 比如, 如何优化器件结构的设计和器件物理的使用, 充分发挥全光调制所带来的调制速度优势; 如何降低调制光束所需功率, 降低调制的能量消耗; 以及如何进一步提高全光调制的可靠性和稳定性等. 而这些问题的解决, 需要未来进一步深入器件结构对器件物理影响的研究, 寻求增强器件中抽运光与石墨烯相互作用的方法, 以及实现器件集成结构的稳定性优化等.



石墨烯-硅基混合集成光调制器与传统的硅基光调制器相比, 能够实现更快的调制速度、更宽的工作带宽和更强的调制深度. 这得益于石墨烯的引入所带来的高载流子迁移率, 宽带吸收和高电光系数. 石墨烯-硅基混合集成光调制器为实现片上廉价可大规模集成的高性能光调制器提供了新的可实用的解决方案, 但现阶段仍存在着一些问题. 比如, 目前实验上所实现的最高速度的调制频率与理论上所预期的 500 GHz 仍然相距甚远 [22]. 一方面, 这受限于石墨烯制备的质量 [3]. 器件制备所需的大

面积石墨烯通常需要利用化学气相沉积的方法制备, 而由该方法制备的石墨烯的载流子迁移率等光电性质与理论上所能实现的仍有较大差距. 另一方面, 对石墨烯-硅基混合集成器件结构和光电物理过程仍然需要更加深入的理解 [4,43]. 如何通过合理的器件结构设计, 充分利用石墨烯中的高载流子迁移率和较快的弛豫过程, 减少硅材料中较低的迁移率和较慢的弛豫过程所带来的限制, 将有助于进一步提升器件的调制速度 [44].

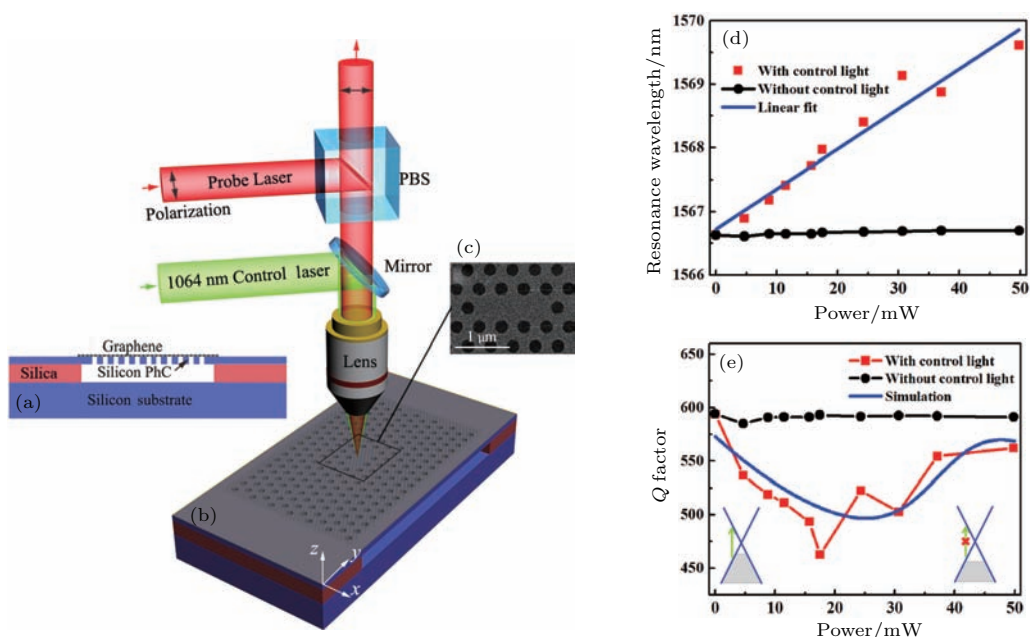


图 10 (a) 石墨烯-硅基混合光子晶体微腔结构示意图; (b) 全光调制示意图; (c) 石墨烯-硅基混合光子晶体微腔扫描电子显微镜图; (d) 不同抽运光功率下共振波长的改变; (e) 不同抽运光功率下品质因子的改变 [42]

Fig. 10. (a) Schematic of a graphene-silicon hybrid photonic crystal microcavity; (b) schematic of all-optical modulation; (c) scanning electron microscopy image of a graphene-silicon hybrid photonic crystal microcavity; (d) shift of the resonance wavelength with different pump laser powers; (e) variation of the quality factor with different pump laser powers [42].

## 5 石墨烯-硅基混合集成光探测器

光探测器是光通信系统中对光信号进行接收和转换的不可或缺的重要器件. 在硅基平台上实现高性能的光探测器仍然存在着巨大的挑战, 这是由于硅材料在近红外通信波段是一种很差的光电吸收材料, 它在波长大于 1100 nm 的近红外波段透明 [6]. 虽然利用双光子吸收或是引入晶格缺陷的方法能够将吸收波长延伸至通信波段, 但这大大增加了工艺的复杂程度, 且制备的探测器响应度较低. 使用 III-V 族半导体材料和锗虽然可以提高响应度, 却仍然存在着价格昂贵和集成困难的问题. 石墨

烯-硅基混合集成光探测器为解决这些难题, 实现高速高响应的光探测器提供了新的可能, 这得益于石墨烯优秀的光电特性与硅材料低损耗的完美结合.

2013 年,《Nature Photonics》杂志连续刊登了 3 篇石墨烯-硅基混合集成光探测器. 哥伦比亚大学的 Englund 研究组 [45] 利用 53 μm 长的石墨烯-硅基混合波导结构, 如图 11 (a) 所示, 实现了 0.1 A/W 响应度的光探测器, 该响应度与最好的锗材料光探测器响应度相当. 如此高的响应度一方面来源于石墨烯本身的材料特性, 另一方面在于器件结构的合理设计. 首先, 利用波导结构增强了光与

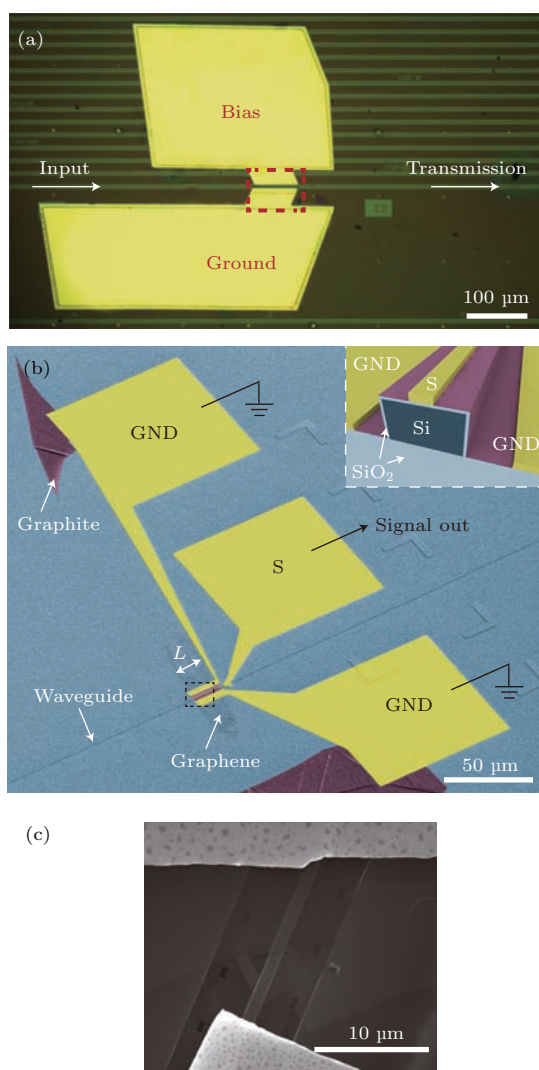


图 11 (a) 石墨烯-硅基超快光探测器显微镜图 [45]; (b) 全光通信波段石墨烯-硅基光探测器彩色扫描电子显微镜图 [46]; (c) 中红外石墨烯-硅基异质结构光探测器扫描电子显微镜图 [47]

Fig. 11. (a) Microscopy image of an ultrafast graphene-silicon photodetector [45]; (b) colored scanning electron microscopy image of a graphene-silicon photodetector covering all optical communication bands [46]; (c) scanning electron microscopy image of a mid-infrared graphene-silicon heterostructure photodetector [47].

石墨烯的相互作用距离, 充分利用了石墨烯的光吸收; 其次, 设计了一对非对称的电极来产生非对称的电势, 减少光生载流子的复合, 增加光生载流子的收集; 此外, 还对器件的高速响应的性能进行了测量, 对于波长为  $1.55 \mu\text{m}$  并受到  $20 \text{ GHz}$  高速强度调制的光信号, 其响应度衰减仅为  $1 \text{ dB}$ , 该高速响应源于石墨烯的高载流子迁移率. 与此同时, 维也纳技术大学的 Mueller 研究组 [46] 也提出了类似的石墨烯-硅基混合波导结构的光探测器, 为了增

加光生载流子的收集, 同样使用了非对称的电极设计, 如图 11 (b) 所示, 利用该  $24 \mu\text{m}$  长的混合集成波导结构, 实现了  $0.05 \text{ A/W}$  的器件响应度. 香港中文大学的 Xu 研究组 [47] 利用悬空的硅基波导和石墨烯相集成, 将混合光探测器的工作光谱扩展到了中红外波段, 如图 11 (c) 所示. 他们在  $2.75 \mu\text{m}$  的入射波长实现了  $0.13 \text{ A/W}$  的响应度. 另外, 与 HgCdTe 和 III-V 族半导体量子阱等中红外光探测器相比, 他们的中红外探测器不需要液氮和热电冷却装置, 能够在室温工作条件下实现  $3.9 \times 10^7 \text{ W}^{-1}$  的光电流-暗电流比.

为了进一步提高石墨烯-硅基混合集成光探测器的响应度和工作带宽, 密歇根大学的 Zhong 研究组 [48] 于 2014 年提出了双层石墨烯异质结构光探测器, 如图 12 (a) 所示. 该器件利用热载流子的隧穿机制, 实现了  $1 \text{ A/W}$  的高响应度, 并在室温下实现了从可见光到中红外的超宽工作带宽. 2016 年, 剑桥大学的 Ferrari 研究组 [49] 实现了具有雪崩光增益的石墨烯-硅基混合集成光探测器, 如图 12 (b) 所示. 同年, 东南大学的 Ni 研究组 [50] 利用界面栅极的设计, 在  $514 \text{ nm}$  的响应波长, 实现了同时满足  $1000 \text{ A/W}$  高响应度和  $400 \text{ ns}$  响应时间的石墨烯-硅基混合光探测器. 通过对以上研究的分析和

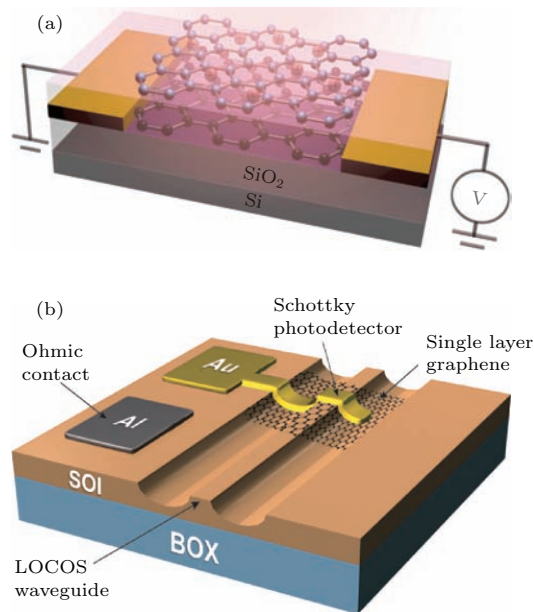


图 12 (a) 石墨硅双层异质结构光探测器示意图 [48]; (b) 石墨烯-硅基肖特基光探测器示意图 [49]  
Fig. 12. (a) Schematic of a graphene double-layer heterostructure photodetector [48]; (b) schematic of a graphene-silicon Schottky photodetector [49].

对比可以发现, 石墨烯-硅基混合集成光探测器的响应度从最初的0.05 A/W发展到现在的1000 A/W, 经历了对石墨烯材料性质和器件结构理解的逐步深入. 器件结构的复杂度也随着性能的提升有所增加, 从最初的石墨烯作为简单的光电材料与波导相集成到引入隧穿效应的双异质结构, 再到引入雪崩效应的肖特基结构. 由此可见, 材料性质和器件物理的深入研究, 对于有效提升器件的性能起着决定性的指导作用.

石墨烯-硅基混合集成光探测器的发展, 为实现廉价且可大规模集成的片上光探测器提供了可实用的方案. 近年来, 石墨烯-硅基混合光探测器一直朝着具有宽光谱、高响应度、高响应速度、低暗电流、小尺寸且可在室温工作的方向发展<sup>[49,51]</sup>. 现阶段, 石墨烯-硅基混合集成光探测器的研究和发展已经较为成熟, 实现同时具备以上所有优点且真正可商用的石墨烯-硅基混合光探测器已成为新的研究目标. 而想要真正取代现有通信波段的锗材料光探测器以及中红外的HgCdTe光探测器, 仍需不断地提升石墨烯-硅基混合光探测器的各项性能指标. 而这有赖于石墨烯制备质量、器件物理和结构设计的进一步的研究和优化. 比如, 通过制备高质量的石墨烯来提高现有的载流子迁移率; 通过加深对器件物理的理解, 合理设计器件结构来增加单位长度石墨烯的光吸收, 以及增加光生载流子的产生效率和收集效率等.

## 6 结 论

本文简要介绍了国际上在石墨烯-硅基混合光子集成电路上的最新进展, 主要涵盖了光源、光波导、光调制器和光探测器这四个光子集成电路中最为重要的组成部分. 石墨烯-硅基的混合集成为实现廉价的可大规模集成的光子集成电路提供了新的解决方案, 它主要解决了硅基光子集成电路在实现有源器件上的困难, 而这得益于具有优越光电特性的石墨烯和低损耗的硅基器件的完美结合. 充分利用石墨烯的材料优势, 实现更高性能的混合集成器件不仅有待于石墨烯和器件制备工艺的提升, 也需要进一步理解器件结构和光电物理过程对器件性能的影响.

## 参考文献

- [1] Geim A K 2009 *Science* **324** 1530
- [2] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, Gellert P R, Schwab M G, Kim K 2012 *Nature* **490** 192
- [3] Geim A K, Novoselov K S 2007 *Nat. Mater.* **6** 183
- [4] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nat. Photon.* **4** 611
- [5] Bao Q L, Loh K P 2012 *ACS Nano* **6** 3677
- [6] Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, Komljenovic T, Reed G T, Vivien L, Marris-Morini D, Cassan E, Virot L, Fédéli J M, Hartmann J M, Schmid J H, Xu D X, Boeuf F, O'Brien P, Mashanovich G Z, Nedeljkovic M 2016 *J. Opt.* **18** 073003
- [7] Li Z Y 2015 *EPL* **110** 14001
- [8] Wang C, Zhong X L, Li Z Y 2012 *Sci. Rep.* **2** 674
- [9] Jalali B, Fathpour S 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4600
- [10] Fan L, Wang J, Varghese L T, Shen H, Niu B, Xuan Y, Weiner A M, Qi M H 2012 *Science* **335** 447
- [11] Roelkens G, Liu L, Liang D, Jones R, Fang A, Koch B, Bowers J 2010 *Laser Photon. Rev.* **4** 751
- [12] Liu M, Zhang X 2013 *Nat. Photon.* **7** 851
- [13] Freitag M, Chiu H Y, Steiner M, Perebeinos V, Avouris P 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 497
- [14] Lawton L M, Mahlmeister N H, Luxmoore I J, Nash G R 2014 *AIP Adv.* **4** 087139
- [15] Lui C H, Mak K F, Shan J, Heinz T F 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 127404
- [16] Kim Y D, Kim H, Cho Y, Ryoo J H, Park C H, Kim P, Kim Y S, Lee S, Li Y, Park S N, Yoo Y S, Yoon D, Dorgan V E, Pop E, Heinz T F, Hone J, Chun S H, Cheong H, Lee S W, Bae M H, Park Y D 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 676
- [17] Shiue R J, Gao Y D, Peng C, Tan C, Efetov D K, Kim D, Home J, Englund D 2016 *Conference on Laser and Electro-Optics San Jose, United States, June 5–10, 2016 paper STu4F.5*
- [18] Kaminer I, Katan Y T, Buljan H, Shen Y C, Ilic O, Lopez J J, Wong L J, Joannopoulos J D, Soljacic M 2016 *Nat. Commun.* **7** 11880
- [19] Cox J D, Marini A, de Abajo F J G 2017 *Nat. Commun.* **8** 14380
- [20] Yoshikawa N, Tamaya T, Tanaka K 2017 *Science* **356** 736
- [21] Pan D Y, Zhang J C, Li Z, Wu M H 2010 *Adv. Mater.* **22** 734
- [22] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, Geng B S, Zentgraf T, Ju L, Wang F, Zhang X 2011 *Nature* **474** 64
- [23] Li H, Anugrah Y, Koester S J, Li M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 111110
- [24] Cheng Z Z, Tsang H K, Wang X M, Xu K, Xu J B 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **20** 4400106
- [25] Liu K, Zhang J F, Xu W, Zhu Z H, Guo C C, Li X J, Qin S Q 2015 *Sci. Rep.* **5** 16734
- [26] Zheng J, Yu L, He S, Dai D 2015 *Sci. Rep.* **5** 7987

- [27] Xiao T H, Cheng Z, Goda K 2017 *Nanotechnology* **28** 245201
- [28] Song S C, Chen Q, Jin L, Sun F H 2013 *Nanoscale* **5** 9615
- [29] Liu F L, Chong Y D, Adam S, Polini M 2014 *2D Mater.* **1** 031001
- [30] Kakenov N, Balci O, Takan T, Ozkan V A, Akan H, Kocabas C 2016 *ACS Photon.* **3** 1531
- [31] Hendry E, Hale P J, Moger J, Savchenko A K, Mikhailov S A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 097401
- [32] Wu R, Zhang Y L, Yan S C, Bian F, Wang W L, Bai X D, Lu X H, Zhao J M, Wang E G 2011 *Nano Lett.* **11** 5159
- [33] Avetissian H K, Mkrtchian G F 2016 *Phys. Rev. B* **94** 045419
- [34] Jablan M, Buljan H, Soljacic M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 245435
- [35] Koppens F H L, Chang D E, de Abajo F J G 2011 *Nano Lett.* **11** 3370
- [36] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S 2012 *Nat. Photon.* **6** 749
- [37] Yan S Q, Zhu X L, Frandsen L H, Xiao S S, Mortensen N A, Dong J J, Ding Y H 2017 *Nat. Commun.* **8** 14411
- [38] Xiao T H, Gan L, Li Z Y 2015 *Photon. Res.* **3** 300
- [39] Majumdar A, Kim J, Vuckovic J, Wang F 2013 *Nano Lett.* **13** 515
- [40] Qiu C, Gao W, Vajtai R, Ajayan P M, Kono J, Xu Q 2014 *Nano Lett.* **14** 6811
- [41] Ding Y, Zhu X, Xiao S, Hu H, Frandsen L H, Mortensen N A, Yvind K 2015 *Nano Lett.* **15** 4393
- [42] Shi Z, Gan L, Xiao T H, Guo H L, Li Z Y 2015 *ACS Photon.* **2** 1513
- [43] Bi W H, Wang Y Y, Fu G W, Wang X Y, Li C L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 047801 (in Chinese) [毕卫红, 王圆圆, 付广伟, 王晓愚, 李彩丽 2016 物理学报 **65** 047801]
- [44] Jin Q, Dong H M, Han K, Wang X F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 237801 (in Chinese) [金芹, 董海明, 韩奎, 王雪峰 2015 物理学报 **64** 237801]
- [45] Gan X T, Shiue R J, Gao Y D, Meric I, Heinz T F, Shepard K, Hone J, Assefa S, Englund D 2013 *Nat. Photon.* **7** 883
- [46] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, Bachmann D, Guider R, Fromherz T, Mueller T 2013 *Nat. Photon.* **7** 892
- [47] Wang X M, Cheng Z Z, Xu K, Tsang H K, Xu J B 2013 *Nat. Photon.* **7** 888
- [48] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, Zhong Z H 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 273
- [49] Goykhman I, Sassi U, Desiatov B, Mazurski N, Milana S, de Fazio D, Eiden A, Khurgin J, Shappir J, Levy U, Ferrari A C 2016 *Nano Lett.* **16** 3005
- [50] Guo X, Wang W, Nan H, Yu Y, Jiang J, Zhao W, Li J, Zafar Z, Xiang N, Ni Z, Hu W, You Y, Ni Z 2016 *Optica* **3** 1066
- [51] Wang X M, Gan X T 2017 *Chin. Phys. B* **26** 034203

SPECIAL TOPIC — Hybrid silicon/graphene and related materials and devices

# Graphene-silicon hybrid photonic integrated circuits\*

Xiao Ting-Hui<sup>1) #</sup> Yu Yang<sup>1)2) #</sup> Li Zhi-Yuan<sup>3)1) †</sup>

1) (*Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

( Received 27 June 2017; revised manuscript received 31 July 2017 )

## Abstract

Silicon photonics is considered as a promising technology to realize high-performance photonic integrated circuits, owing to its complementary metal oxide semiconductor-compatibility which is applicable for large-scale integration at low cost. However, due to the limitation of optoelectronic properties of silicon, the challenge to the realization of high-performance active device on the silicon integrated platform still exists. The recent development of graphene-silicon hybrid photonic integrated circuit provides a practical solution to this problem, because graphene, as a superior two-dimensional material, possesses many advantageous optoelectronic properties, such as high mobility, high electro-optical coefficient, and broadband absorption, which can be fully exploited to break through the material limitation of silicon. Moreover, compared with other active integrated materials such as germanium and compound semiconductors, graphene is cost-effective and can be conveniently integrated with silicon photonic device. Here, we review some important research progress of graphene-silicon hybrid photonic integrated circuits that include optical sources, optical waveguides, optical modulators, and photodetectors. The challenges and prospects of these devices are also analyzed, which are expected to be beneficial to the relevant research communities.

**Keywords:** silicon photonics, graphene photonics, integrated photonics

**PACS:** 78.67.Wj, 85.30.-z, 42.82.-m

**DOI:** [10.7498/aps.66.217802](https://doi.org/10.7498/aps.66.217802)

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB632704) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11434017).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [phzyli@scut.edu.cn](mailto:phzyli@scut.edu.cn)