表面等离子体狭缝波导上的石墨烯光电探测器

王逸伦^{1†}, 黄鑫宇^{2†}, 周德¹, 严其志¹, 姜志滨¹, 陈燎¹, 李响³, 叶镭^{1,2*}, 张新亮^{1,2*}

1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074;

2. 华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074;

3. Electrical Engineering Division, School of Engineering, University of Cambridge, Cambridgeshire CB31SE, UK

*联系人, 叶镭, E-mail: leiye@hust.edu.cn; 张新亮, E-mail: xlzhang@mail.hust.edu.cn

†同等贡献

收稿日期: 2020-05-03; 接受日期: 2020-06-05; 网络出版日期: 2020-11-24

国家自然科学基金(编号: 61927817, 61735006)和国家重点研发计划(编号: 2019YFB2203100)资助项目

摘要 基于表面等离子体的硅基集成光电探测器因具有THz带宽潜力而受到广泛关注. 本文基于简化的两步光刻工艺实现表面等离子体狭缝波导与石墨烯相结合的光电导探测器, 直接采用对称的狭缝波导金属作为微波电极, 理论计算3-dB带宽大于120 GHz, 受限于测试设备, 实际测试的带宽大于70 GHz, 实验上实现了72 Gbit/s NRZ和64 Gbit/s PAM-4等高速信号的接收, 误码率均低于15%的软判决前向纠错码门限. 由于表面等离子体增强了光和石墨烯的相互作用, 在吸收区长度不大于7 μm 和偏置电压0.4 V的条件下, 探测器的响应度大于0.13 A/W. 该探测器解决了目前表面等离子体探测器普遍存在工艺复杂、高速性能受限于吸收材料载流子动态特性的问题, 具备超小尺寸、高速大带宽、工艺简单和与CMOS工艺兼容的特点, 有望在高速光互连、太赫兹发射以及太赫兹通信中得到应用.

关键词 光电探测器, 表面等离子体光子学, 石墨烯, 光电导效应

PACS: 85.60.Gz, 71.36.+c, 78.66.-w, 73.50.Pz

1 引言

硅基光子学器件与集成^[1,2]因为具有与CMOS工艺兼容、成本低的优点, 在高速光通信、光互连、微波光子学等领域被国内外研究者广泛研究. 为解决光电集成中光学和电学元件尺寸失配的问题, 基于硅基光子学平台的表面等离子体结构^[3]一直吸引着大批研究者. 表面等离子体结构^[4-8]能够把光场限制在突破光

学衍射极限的深度亚波长量级, 并在近场范围内实现显著的场增强作用, 可以大大减小光器件尺寸进而实现大规模光电集成. 另外, 其超小的尺寸结构可以大幅减小载流子输运时间, 并具有超小的电容, 有潜力实现THz量级的工作带宽^[9,10]. 因而将表面等离子体结构与光吸收材料结合^[11], 有望实现高响应度、高速大带宽的光电探测器, 并可望应用于高速光通信、光互连当中. 同时, 由于太赫兹通信技术^[12,13]有望在6G

引用格式: 王逸伦, 黄鑫宇, 周德, 等. 表面等离子体狭缝波导上的石墨烯光电探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 054204
Wang Y L, Huang X Y, Zhou D, et al. Graphene-on-plasmonic slot waveguide photodetector (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 054204, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0157

移动通信中得到实际应用, 研究具有THz带宽潜力的光电探测器对发射太赫兹信号、接收大带宽的高速信号也至关重要.

近年来, 硅基表面等离子体探测器有着大量的研究报道. Muehlbrandt等人^[14]利用内部光发射原理及金属作为光吸收材料, 实现了40 GHz工作带宽、0.12 A/W的响应度, 以及40 Gbit/s光信号的接收. 另外, Harter等人^[10]利用该探测器实现了集成的THz信号收发器. Salamin等人^[15]利用光电导效应及非晶锗作为光吸收材料, 实现了100 GHz工作带宽、36%的内量子效率, 以及72 Gbit/s光信号的接收. 而二维材料^[16]石墨烯^[17]作为一种高性能光吸收材料, 相比锗、金属或其他传统光吸收材料, 具有优异的载流子迁移率, 本征理论带宽大于500 GHz^[18], 在探测器领域有着大量的工作报道^[19-28]. 最近石墨烯和硅基表面等离子体结构的结合也吸引了越来越多的关注^[29-34]. 利用表面等离子体结构的场增强能力和潜在的高速特性, 可以提高石墨烯探测器的响应度, 以及实现高速大带宽的探测. 其中Muench等人^[31]基于光热电(Photothermo-Electric, PTE)效应和表面等离子体狭缝结构, 实现了42 GHz工作带宽及12.2 V/W的响应度; Ma等人^[30]基于光辐射热(Photobolometric, PB)效应和蝴蝶结型表面等离子体结构实现了110 GHz工作带宽、0.5 A/W的响应度, 以及100 Gbit/s非归零码(Non-Return-to-Zero, NRZ)和100 Gbit/s四电平脉冲幅度调制(Four-Level Pulse Amplitude Modulation, PAM-4)信号的接收; Ding等人^[32]基于光伏(Photovoltaic, PV)效应和表面等离子体狭缝波导(Plasmonic Slot Waveguide, PSW)实现了110 GHz工作带宽、0.36 A/W的响应度, 以及40 Gbit/s归零码(Return-to-Zero, RZ)信号的接收; Guo等人^[33]基于光辐射热/光电导(Photobolometric/Photoconductive, PB/PC)及混合表面等离子体波导实现了40 GHz带宽、0.4 A/W的响应度, 以及30 Gbit/s NRZ信号的接收. 然而这些探测器在实现高性能的同时需要使用多步光刻或材料生长(如电子束蒸发、等离子体增强化学气相沉积、原子层沉积等), 会增加工艺复杂度, 提高器件制作的工艺成本. 采用PSW和石墨烯结合的金属-石墨烯-金属(Metal-Graphene-Metal, MGM)结构, 我们提出直接利用对称的PSW金属结构做微波电极, 简化工艺, 实现低成本、高性能的PC探测器.

本文主要研究了基于PSW与少层石墨烯结合的

超小尺寸片上高速探测器, 采用对称金属结构的PSW和机械剥离得到的石墨烯, 简化了探测器工艺制作流程, 仅需两步光刻、一次金属生长以及石墨烯干法转移即可实现低成本的探测器制作. 利用PSW提供的超小电阻-电容(Resistance-Capacitance, RC)常数和超短光生载流子漂移通道, 以及石墨烯提供的超快载流子动态特性, 石墨烯-PSW探测器实现了理论3-dB带宽大于120 GHz的高速响应. 利用PSW光场增强的特性和少层石墨烯的设计, 在吸收区域尺寸不大于 $7\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ nm}\times 90\text{ nm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的条件下, 探测器实现了0.13 A/W的响应度, 且在整个光通信C波段具有平坦响应. 另外探测器在1550 nm波长处进行了眼图及误码率测试, 实现了对72 Gbit/s NRZ和64 Gbit/s PAM-4信号的高质量接收. 该方案在保证探测器高速大带宽的同时, 实现了工艺制作的简化, 有利于实现低成本CMOS兼容的片上集成, 满足未来通信领域对高速探测器的广泛应用需求.

2 原理、设计制作及材料表征

图1(a)为石墨烯-PSW探测器工作原理示意图. 携带信号的横电(Transverse Electric, TE)光通过锥形转换器耦合到PSW中, 被PSW中激发的表面等离子极化激元增强, 然后与PSW表面的石墨烯相互作用后被有效吸收产生光生载流子. 光生载流子在偏置电压的驱动下形成光电流, 实现信号的探测. 图1(b)为探测器的截面图及模场分布, PSW由对称的金属结构Au (90 nm)/Ni (5 nm)及宽度仅为100 nm狭缝组成, PSW上方是石墨烯. 图1(c)为探测器的俯视图及模场分布, 在PSW中输入光功率为1 mW的条件下, 石墨烯靠近金属边缘的电场分量可高达 10^8 V/m . 沿着光传输方向, 输入光被探测区域(金属和石墨烯)共同吸收, 探测器的有效光吸收取决于石墨烯和金属的吸收系数比值. 探测器中石墨烯的电势分布如图1(d)所示, 由于钉扎效应^[35], 石墨烯的费米能级因为与金电极接触会发生 Φ_{Au} 的移动, 相当于与两边金电极接触的石墨烯有着相同程度的p型掺杂, 其电势低于通道上石墨烯的本征掺杂, 因而石墨烯能带发生弯曲^[20]. 在偏置电压下, 石墨烯能带曲线发生倾斜, 需要说明的是, 当光输入时, 石墨烯探测器基于PTE效应、PB效应和PC效应均会产生光电流. 基于PTE效应^[24]的光电流与通道上石墨烯温度梯度和

图 1 (网络版彩图) (a) 石墨烯-PSW探测器的概念图; (b) 探测区域横截面上的模场分布; (c) 俯视下探测器工作区域沿光传播方向的场分布; (d) 探测器在偏置电压不为0时的工作原理. E_F 为石墨烯费米能级, E_D 为石墨烯狄拉克点位置, E_{FP} 为石墨烯费米能级峰值, V_{bias} 为偏置电压, Φ_{Au} 为石墨烯与金属接触后费米能的改变大小

Figure 1 (Color online) (a) Schematic diagram of the graphene-on-PSW photodetector; (b) cross-section view of the photodetector; (c) top view of the photodetector showing strong plasmonic field enhancements along the edges of the metal and in the gap of PSW; (d) the potential profile of the graphene at non-zero bias voltage. E_F is the fermi level, E_D is the Dirac point, and E_{FP} is the peak Fermi energy point. Φ_{Au} is the change of the Fermi level due to the metal-graphene contact.

掺杂分布有关, 即与 $(S_2 - S_1)dT/dT$ 成正比, 其中 S_1 和 S_2 是石墨烯与两个金属电极接触的塞贝克系数. 然而在石墨烯-PSW探测器结构中, 通道上石墨烯的温度梯度分布是中心对称的, 而且相同的金电极与石墨烯接触, 引入相同程度的掺杂, 所以基于PTE效应产生的光电流可以忽略不计. 基于PB效应^[30]的光电流与温度诱导通道上石墨烯的电阻发生改变有关, 其中净光电流 $I_{ph} = V_{bias} / ((dR/dT)\Delta T)$, dR/dT 是辐射热系数, ΔT 是光诱导的温度变化. 基于PC效应^[33]的光电流则与光生载流子诱导石墨烯电导率改变有关, 其中电导率的变化 $\Delta\sigma = \Delta ne\mu$, Δn 为光生载流子浓度的变化, μ 为通道内石墨烯的载流子速率. 如果PB效应占主导地位, 石墨烯电导率会随着光输入而减小, 如果PC效应占主导地位, 石墨烯电导率会随着光输入而增大. 因而可根据在偏置电压下电流随光输入的变化情况, 判断在石墨烯-PSW探测器中占主导地位的探测原理. 另外, 由于本方案不涉及控制栅压, 当石墨烯本征掺杂程度低时, PB效应对光电流影响较小^[36]. 结合我们后续测试结

果, 可以判定本文制作的器件在偏置电压下工作时产生的光电流主要是由PC效应贡献的.

PSW金属狭缝结构可增强石墨烯对光的吸收, 同时也会引入额外的吸收损耗, PSW的吸收损耗会影响探测器的响应度, 因此PSW的尺寸设计需要权衡石墨烯的吸收系数和PSW的吸收系数. 定义石墨烯的吸收系数为 α_g (dB/ μm), PSW的吸收系数为 α_m (dB/ μm), 则在探测区域石墨烯的光吸收占比可表示为 $\eta_g = \alpha_g / (\alpha_g + \alpha_m)$. 采用Kubo公式^[37]定义石墨烯的电导率, 我们利用有限元方法仿真了在1550 nm波长处2层石墨烯光吸收占比 η_g 与PSW结构中狭缝宽度 w 和金厚度 h 的关系, 其中在1550 nm波长处空气和二氧化硅的折射率分别为 $n_{\text{Air}} = 1$, $n_{\text{SiO}_2} = 1.444$, Au和Ni的相对介电常数分别为 $\epsilon_{r-\text{Au}} = -115.63 - 10.708i$, $\epsilon_{r-\text{Ni}} = -55.03 - 50.258i$. 如图2(a)所示, 当PSW结构参数 w 和 h 越小时, 石墨烯 η_g 越大, 表示探测器中有效光吸收越强, 从而探测器响应度也越高. 考虑到PSW的加工工艺, 本工作选择的PSW结构参数为: 狭缝宽度为100 nm, 金厚度为90 nm. 在该参

图 2 (网络版彩图) (a) 石墨烯光吸收占比 η_g 与金属狭缝宽 w 和高 h 之间的关系; (b) PSW的扫描电子显微镜图像, 包含锥形转换器以及金属狭缝的放大图; (c) 在光通信C波段PSW (图中为Metal)、2/4层石墨烯实际的吸收损耗, 插图是1/2/3/4层石墨烯的光吸收率 η 与长度的关系, 在探测区域实现95%光吸收时, 所需的石墨烯长度分别为15, 11, 9, 8 μm . (d), (e)分别是2层(长为6.1 μm)、4层(长为7 μm)石墨烯的拉曼光谱以及对应的探测器金相图

Figure 2 (Color online) (a) Calculated graphene absorption ratio η_g as a function of plasmonic slot and height; (b) SEM images of the PSW; (c) the absorption loss of the PSW, double-layer graphene, and four-layer graphene, respectively. Insert: calculated graphene absorbance η as a function of the graphene layers and length. When the 95% light is absorbed by the photodetector, the desired lengths of graphene are 15, 11, 9 and 8 μm for monolayer graphene, double-layer graphene, three-layer graphene, and four-layer graphene, respectively. (d), (e) Measured the Raman spectra for the double-layer graphene, and four-layer graphene after the dry-transfer process, respectively. The insert shows the optical microscopy images of the 6.1- μm long double-layer-graphene photodetector and the 7- μm long four-layer-graphene photodetector.

数下, 2层石墨烯-PSW探测器理论吸收系数(α_g , α_m)为(0.705 dB/ μm , 0.577 dB/ μm), 其中包含了黏附层Ni的吸收影响, 计算得到石墨烯光吸收占比 η_g 为54.9%.

器件制作过程中, 我们在商用的绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)样片上进行了PSW工艺制作, 其中顶层硅厚度为220 nm, 氧化层厚度为2 μm . 首先, 采用一步电子束光刻(EBL, Vistec EBPG 5000plus ES)和感应耦合等离子体刻蚀(ICP, Plasmalab system 100 ICP180), 制作了硅基无源器件部分, 包括光栅、硅波导、锥形耦合器等结构. 接着采用一步EBL、电子束蒸发(EBE, Ohmiker-50B)和剥离工艺, 制作了金属狭缝波导. 这样, 共采用两步光刻和一次金属生长完成硅基PSW的制作. 工艺制作的硅基PSW的电子显微镜图如图2(b)所示, 包括紧凑的锥形转换器以及金属狭缝结构, 显示了高质量的器件制作. PSW制作完成后,

需要结合合适层数和长度的石墨烯, 以实现高响应度的光探测, 于是在该PSW尺寸下, 本文分别仿真计算了1/2/3/4层石墨烯的光吸收率 η 与石墨烯长度的关系, 如图2(c)插图所示. 随着层数增加, 石墨烯的光吸收率 η 增大, 达到最大光吸收率时所需的长度也会减小, 在整个探测区域实现95%光吸收时, 所需的1/2/3/4层石墨烯长度分别为15, 11, 9, 8 μm , 因此石墨烯层数的增加有利于减小探测器尺寸以及提升响应度, 需要注意的是, 这里采用了石墨烯少于5层时电导率模型相同的假设. 通过机械剥离得到合适的石墨烯材料后, 采用干法将石墨烯材料定点转移到PSW上. 如图3所示流程, 用PDMS(聚二甲基硅氧烷)承载PVA(聚乙烯醇)材料, 利用PVA黏附性加热增强的特点, 将石墨烯材料从硅片上黏附下来, 并转移至PSW上. 为提高石墨烯转移成功率, 我们选择的PSW长度大于石墨烯样品

的长度, 另外转移平台的误差在 $1\ \mu\text{m}$ 左右. 在石墨烯转移完成后, 我们将芯片在室温下静置于去离子水中, 去除石墨烯表面残留的PVA材料, 然后使用丙酮、酒精、去离子水依次清洁芯片, 最后对芯片进行干燥和退火处理来减少其他杂质对石墨烯性能的影响, 并改善金属和石墨烯的接触.

我们实际制作了长为 $6.1\ \mu\text{m}$ 的2层石墨烯-PSW探测器(PD1)和长为 $7\ \mu\text{m}$ 的4层石墨烯-PSW探测器(PD2), 使用Cut-back方法, 分别表征了在光通信C波段金属狭缝、2/4层石墨烯的吸收损耗, 如图2(c)所示, 其中在 $1550\ \text{nm}$ 波长处对应的吸收损耗分别是 0.642 , 0.945 , $1.196\ \text{dB}/\mu\text{m}$. 实际上, PSW的吸收损耗在2层石墨烯转移前后存在轻微的差别, 但仅为 $4 \times 10^{-3}\ \text{dB}/\mu\text{m}$, 因而在使用Cut-back方法计算吸收损耗时可忽略不计. 相比仿真得到的损耗, 实验测得的损耗还包含了由金属侧壁粗糙度引起的额外损耗, 由石墨烯转移工艺引起的额外损耗以及实验测量误差等. 为了表征石墨烯的质量和层数, 在 $532\ \text{nm}$ 泵浦光下, 对转移到PSW上的石墨烯进行了拉曼光谱表征, 如图2(d)和(e)所示, 分别是2/4层石墨烯的拉曼光谱. 观测图中 $1350\ \text{cm}^{-1}$ 左右的石墨烯缺陷峰D峰, 说明PSW上的石墨烯缺陷少质量好, 计算石墨烯2D峰处的半高全宽分别为 52 和 $62\ \text{cm}^{-1}$, 可判断石墨烯的层数^[38]分别为2层和4层. 插图分别表示2/4层石墨烯-PSW探测器的金相显微镜图. 实验中器件受到驱动电压或者静电的影响, 部分可能受到损坏, 因而并非每个器件都可以完成所有光电性能的有效测试. 下文主要用PD1展示石墨烯-PSW探测器的静态光电响应, 用PD2展示探测器高速信号的接收实验, 同时用PD1和PD2展示探测器的高频响应.

3 石墨烯-PSW探测器的光电性能

3.1 静态光电响应

为了表征探测器的静态光电响应特性, 我们用图4(a)所示装置图对PD1进行了性能测试, 使用在光通信C波段可调谐的激光器产生连续光, 将连续光通过单模光纤和入射光栅输入到PD1中, 在入射光栅前用50:50的耦合器分出一路连接光功率计以监控入射光功率, 在出射光栅后连接第二个光功率计以监控耦合状态, 利用高精度的数字源表(Keysight B2902A)和直流探针将偏置电压加载在探测器两个电极上, 并测得输入光前后的电流. 探测器的响应度为 $I_{\text{net}}/P_{\text{in}}$ (净光电流和输入光功率的比值), 这里的输入光功率为实际输入探测区域的光功率. 当输入光功率为 215 和 $430\ \mu\text{W}$ 时, PD1响应度与偏置电压关系如图4(b)所示, 在 $0.4\ \text{V}$ 偏置电压和 $215\ \mu\text{W}$ 输入光功率时, PD1响应度为 $0.13\ \text{A}/\text{W}$. 随着偏置电压增大, 探测器响应度出现饱和, 这是由载流子漂流速度饱和或焦耳加热^[36]引起载流子数目减少等导致的. 此外, 在相同偏压下随着光功率增加, 探测器响应度减小, 这是归因于泡利阻塞原理^[39]或焦耳加热^[36]. 图4(c)展示了当输入光功率为 $215\ \mu\text{W}$ 时, PD1净光电流与电压的关系, 净光电流是入射光前后通过探测器的电流差. 图中可以看出电流随着光输入而增大, 这是石墨烯探测器PC效应的典型特征. 图4(d)反映了 $0\ \text{V}$ 时探测器响应度与工作波长的关系, 可以发现PD1在光通信C波段范围内具有平坦的光电响应, 约为 $5\ \text{mA}/\text{W}$, 探测器支持的光谱工作范围受限于激光器支持的波长范围和耦合光栅的光谱响应. 此外, 在 $0\ \text{V}$ 时探测器存在光电响应, 表明两个电极

图 3 (网络版彩图)石墨烯干法转移流程

Figure 3 (Color online) Graphene dry-transfer process.

图 4 (网络版彩图) (a) 探测器静态光电响应测试的装置图; (b) PD1 在 215 和 430 μW 输入光功率和 1550 nm 波长下, PD1 响应度与偏置电压的关系; (c) 在 215 μW 输入光功率时, PD1 净光电流与偏置电压的关系, 可看出 PC 效应占主导地位; (d) 在偏置电压为 0 V 时, PD1 在光通信 C 波段响应平坦

Figure 4 (Color online) (a) Measurement setup for the static response of the photodetector. (b) External responsivity as a function of the bias voltage for the PD1 at 1550 nm, with the input optical power of 215 and 430 μW ; (c) measured net photocurrent as a function of the bias voltage with an input optical power of 215 μW . An increase of current indicates a dominated PC effect; (d) responsivity as a function of the wavelength of the incident light at zero bias voltage.

间内建电场并不为 0, 存在一定的内建势垒差, 主要由于与两边金电极接触的石墨烯表面态不同。

3.2 高频响应

为了表征探测器的高速性能, 我们搭建了如图 5(a) 所示的测试系统, 利用 70 GHz 的矢量网络分析仪 (VNA, Anritsu MS4647B) 测试 PD1 和 PD2 的频率响应。为了提高器件的响应功率, 输入耦合光栅的光功率设置为 11 dBm, 偏置电压设置为 1 V。如图 5(b) 和 (c) 所示, 分别为 2/4 层石墨烯探测器的频率响应曲线, 其中调制器和射频线缆的带宽对测试的影响已通过 VNA 自带的校准件排除。由于测试中缺乏 50 GHz Ground-Signal (GS) 高速探针 (High-Speed Probe, HSP) 的校准件, 图中的测试结果并未排除探针带宽的影响, 但仍然显示了 PD1 和 PD2 具有 3-dB 带宽大于 70 GHz 的优越性能。PD1 和 PD2 的频率响应曲线不同主要由于与金电极接触的石墨烯表面态不同, PD2 中存在相对更大的接触势垒, 对低频响应影响更大。据报道^[30,32], 可以使用 110 GHz 光谱仪通过光外差探测的方法测得器件更高频率的响应, 但目前受限于测试设备, 该探测器并未进行更高频率的测试。上述结果表明石墨烯-PSW 探测器的高速性能并未受工艺方法和石墨烯层数的影响。

本工作使石墨烯-表面等离子体波导探测器的制作工艺得到简化, 并有效避免了多步光刻工艺增加石墨烯缺陷以及机械剥离产生良好单层石墨烯效率低的问题。此外石墨烯层数的增加, 理论上还可以提高探测器的响应度。

接着对石墨烯-PSW 探测器带宽进行进一步的理论分析, 探测器的带宽主要由载流子的渡越时间和探测器的 RC 常数决定。探测器渡越时间受限的带宽^[18]

$$f_{\text{tr}} = \frac{3.5}{2\pi\tau_{\text{tr}}} RC, \text{ 常数受限的带宽 } f_{\text{RC}} = \frac{1}{2\pi(R+R_{\text{L}})C},$$

总的 3-dB 带宽 $f_{3\text{-dB}} = \left(\frac{1}{f_{\text{tr}}^2 + f_{\text{RC}}^2} \right)^{1/2}$ 。参考的石墨烯载流子

漂移速度^[32]为 $1.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$, 渡越石墨烯-PSW 探测器 100 nm 的狭缝则仅需要 0.91 ps, 因此 f_{tr} 预测大于 610 GHz。关于 PD1 和 PD2 的 f_{RC} 分析数据如表 1 所示。参考相似结构的 PSW 光电导探测器^[15] 的 RC 常数, 在其波导长为 10 μm , 狭缝宽为 160 nm, 金属厚度为 100 nm 时, 测得的电容为 2.7 fF, 类比计算我们的探测器时, 假设两个探测器中电容的电介质相同, 实际上我们的石墨烯-PSW 探测器中电容的电介质主要为空气, 比参考结构中非晶锗的介电常数要小, 因而计算得到的 f_{RC} 会偏小。

图 5 (网络版彩图) (a) 探测器带宽测试的装置图, (b), (c) 分别是PD1和PD2的频率响应曲线

Figure 5 (Color online) (a) Measurement setup for the bandwidth test. (b), (c) Bandwidth characterization of the PD1 and PD2, respectively.

表 1 石墨烯-PSW探测器的RC常数受限的带宽计算

Table 1 The RC-product-limited bandwidth of the graphene-on-PSW photodetector

器件	长×宽×高 ($\mu\text{m} \times \text{nm} \times \text{nm}$)	电容 (fF)	电阻 (Ω)	f_{RC} (GHz)
参考	10×160×100	2.7	—	—
PD1	15×100×90	5.8	155	134
PD2	10×100×90	3.8	284	125

实际上, 石墨烯-PSW探测器制作过程中, PD1中长6.1 μm 的2层石墨烯转移至15 μm 长的PSW上, PD2中长7 μm 的4层石墨烯实际转移至10 μm 长的PSW上, 因而计算探测器电容时需考虑的是整个PSW的电容. 表1中的电阻值为实验测得的电阻值, 包括石墨烯通道电阻以及石墨烯和金电极的接触电阻. 理论上, 4层石墨烯通道电阻值近似为2层石墨烯的1/2, 由表1中测得的电阻值可知, 4层石墨烯测得的电阻却更大, 主要来源于石墨烯和金电极的接触电阻. 根据 f_{RC} 和表1中PD1和PD2的 f_{RC} , 计算得到 $f_{3\text{-dB}}$ 分别为130和122 GHz. 综上石墨烯-PSW探测器的实际带宽大于122 GHz, 主要

受限于RC常数, 其中电阻主要受限于石墨烯和金电极的接触电阻, 电容主要受限于PSW的结构参数. 本工作已通过退火减小石墨烯和金电极的接触电阻, 据相关文献报道还可以通过使用定制镍电极接触^[40]、边缘接触^[41]、双重电极接触^[42]等方法进一步减小接触电阻, 但同时会引入工艺复杂度. 器件的电容参数则可以通过优化金属厚度, 或优化与石墨烯长度匹配的PSW长度得到改善, 如若实际将6.1 μm 长的2层石墨烯转移到10 μm 长的狭缝波导上, $f_{3\text{-dB}}$ 可以从130 GHz提升至193 GHz.

3.3 高速信号的接收

除了响应带宽外, 探测器对高速信号的接收能力也非常重要. 如图6(a)所示的PD2数据接收实验装置, 直接展示了探测器在光通信系统中的应用情况. 电信号由任意波形发生器(AWG, Keysight M8195A)或码型发生器(BPG, SHF 12104A)产生后, 经由电放大器(EA, CENTELLAX OA4SMM4)放大, 通过商用的马赫曾德尔调制器(MZM, 3-dB带宽: 30 GHz)调制到由可调谐激光器(TL)产生的波长为1550 nm的激光上. 光信

Figure 6 (Color online) (a) Measurement setup for the high-speed signal reception; (b) detected eye diagrams for 64 Gbit/s PAM-4 signal; (c) detected eye diagrams for 64 and 72 Gbit/s NRZ signals.

号被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后,通过耦合光栅和锥形转换器,进入石墨烯-PSW探测器中(实际进入探测区域的光功率为4 dBm),同时通过Bias-tee将1 V的偏置电压加在探测器上,生成的电信号由高速探针采集出来,通过Bias-tee的另一个接口经由电放大器(SHF S804A)放大后,由实时示波器(DSA, 59 GHz带宽)或采样示波器(DCA, 80 GHz带宽)进行观测采集, DSA采集的数据通过离线数字信号处理(Offline DSP)(时钟恢复、均衡和符号判决等)得到信号眼图和误码率,而DCA则可以直接得到信号眼图和通过 Q 值计算误码率。将图6(a)中的线路连到1端口, AWG生成64 Gbit/s的PAM-4电信号,由探测器探测经过DSA采集和离线DSP处理后,得到64 Gbit/s PAM-4信号眼图,误码率为 1.78×10^{-2} , 低于15%软判决前向纠错码门限(Soft-Decision FEC Threshold)^[43](参考误码率为 1.9×10^{-2}),如图6(b)所示。将图6(a)中的线路连到2端口, BPG生成64和72 Gbit/s的NRZ电信号,由探测器探测并经过DCA采集后,得到64和72 Gbit/s的信号眼图,误码率分别为 2.7×10^{-4} 和 9.1×10^{-3} , 分别低于7%硬判决前向纠错码门

限(Hard-Decision FEC Threshold)^[44](参考误码率为 3.8×10^{-3})和15%软判决前向纠错码门限。图6(b)和(c)眼图包含了系统所有的噪声,总噪声包含光发射机光源和电放大器的噪声、光放大器的噪声以及接收机中探测器和电放大器的噪声,探测器的噪声仅占总噪声的一部分。探测器的噪声主要包括散粒噪声和热噪声,在64 Gbit/s NRZ信号眼图测试中,实际测得的净光电流为90 μA ,暗电流为3.52 mA,计算得到探测器散粒噪声为8.9 μA ,热噪声为2 μA ,探测器自身的信噪比约为18.3 dB,因而数据接收实验并不受限于探测器自身噪声影响,而主要受限于系统的信号发射端和放大器的噪声。不过探测器暗电流较大仍会影响接收信号的信噪比,从而导致探测器灵敏度降低,目前石墨烯探测器可通过无偏置电压时的光热电效应^[31]或者光伏效应^[20]实现超小的暗电流。另外因受限于信号发生器的带宽,我们并未进行更高速率的信号测试。总的来说,良好的信号眼图以及误码率验证了石墨烯-PSW探测器优秀的信号接收能力,体现了石墨烯-PSW探测器应用于高速光通信中的潜能和可行性。

表 2 表面等离子体波导-石墨烯探测器的性能对比(N.A.: 不涉及)

Table 2 The state-of-the-art plasmonically enhanced graphene photodetectors (N.A.: not available)

序号	长度 (μm)	光刻/材料生长次数	响应度	带宽 (GHz)	信号接收 (Gbit/s)	原理
1 ^[30]	6	3/2	0.50 A/W	110	100	PB
2 ^[31]	4	4/5	12.2 V/W	42	N.A.	PTE
3 ^[32]	19	4/2	0.36 A/W	110	40	PV
4 ^[33]	20	5/4	0.40 A/W	40	30	PB
5 ^[34]	5	3/3	0.67 A/W	N.A.	N.A.	PB
			0.20 A/W			PV
本文PD2	7	2/1	N.A.	70	72	PC
本文PD1	6.1	2/1	0.13 A/W	70	N.A.	

4 讨论和结论

如表2所示,我们对最新报道的表面等离子体结构与石墨烯结合的探测器性能进行了比较,包括器件长度、光刻和材料生长(包括电子束蒸发、等离子体增强化学气相沉积、原子层沉积等)次数、响应度、带宽、信号接收及原理等指标.总的来说,表面等离子体波导可以大幅减小石墨烯探测器的尺寸,表中探测器的尺寸均在20 μm 以下.本文从工艺便利的角度出发,仅用两步光刻,一次电子束蒸发和石墨烯干法转移的方式,实现了低成本的器件制作,是表中工艺步骤最少的探测器.针对探测器的响应度来说,该方案虽然高于一些与硅波导结合^[20,21]的石墨烯探测器,但相比表中其他与表面等离子体波导结构结合的方案有一定的差距,主要受限于转移过程中引入的额外吸收损耗和石墨烯-电极接触的表面态.理论上,多层石墨烯的设计可以增强石墨烯的光吸收占比,有利于提高响应度.在高速性能方面,石墨烯-PSW探测器测得了实验设备最高支持的70 GHz响应带宽和72 Gbit/s信号的接收,实验结果显示仍未到器件的性能极限,相信通过优化石墨烯的转移工艺,改善额外吸收损耗和接触表面态,可以进一步提高器件响应度,在设备支持的情况下可以和表中工作1^[30]一样,满足下一代光通信中单

波100 Gbit/s探测的应用需求.此外,探测器上的石墨烯若直接和空气接触可能会受到空气中水分子或灰尘等杂质的影响,我们可以采用原子层沉积的方法,在器件表面生长一层氧化铝薄膜对器件进行封装^[31],然后给电极开测试窗口,从而提高石墨烯探测器的稳定性.

综上所述,本文采用石墨烯干法定点转移及与PSW对称金属结构一体化的电极设计,实现了工艺简化、低成本的探测器制作;采用PSW光场增强的特性和少层石墨烯的设计,减小探测器尺寸的同时实现了0.13 A/W的响应度.受限于测试条件,探测器测试3-dB带宽为70 GHz,基于测得的电阻和参考的电容参数,理论计算的带宽大于120 GHz,后续还可以通过优化接触电阻和设计PSW尺寸进一步提高探测器带宽.此外,我们实现了72 Gbit/s NRZ信号和64 Gbit/s PAM-4信号的高质量接收,误码率均低于15%的软判决前向纠错码门限.该光电探测器工艺简单,性能优异,值得进一步进行高速探测器应用的探索,如与片上天线结合,实现微波或THz信号的发射或接收等应用.另外,还可以考虑使用CVD生长的石墨烯,实现探测器大规模制作或实现更复杂功能的石墨烯器件,如偏振复用光接收机、相干光接收机等高速光互连所需的核心器件.

致谢 本工作中芯片是在武汉光电国家研究中心光电子微纳制造工艺平台制作完成,感谢工程师李攀、徐巍老师,及助理管理员崔成聪、王玉西博士给予的工艺支持.感谢工程师苏俊老师在扫描电子显微镜方面的帮助.感谢童磊博士和田扬博士在石墨烯和探测器原理方面的讨论与交流.

参考文献

- 1 Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on silicon photonics. *J Opt*, 2016, 18: 073003
- 2 Shu F J, Zhang P J, Qian Y J, et al. A mechanically tuned Kerr comb in a dispersion-engineered silica microbubble resonator. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 254211
- 3 Dionne J A, Sweatlock L A, Sheldon M T, et al. Silicon-based plasmonics for on-chip photonics. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2010, 16: 295–306
- 4 Brongersma M L, Shalaei V M. The case for plasmonics. *Science*, 2010, 328: 440–441
- 5 Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit. *Nat Photon*, 2010, 4: 83–91
- 6 Schuller J A, Barnard E S, Cai W, et al. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. *Nat Mater*, 2010, 9: 193–204
- 7 Du W, Wen X, Gérard D, et al. Chiral plasmonics and enhanced chiral light-matter interactions. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 244201
- 8 Wu R Y, Bao L, Wu L W, et al. Broadband transmission-type 1-bit coding metasurface for electromagnetic beam forming and scanning. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 284211
- 9 Burla M, Hoessbacher C, Heni W, et al. 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics. *APL Photon*, 2019, 4: 056106
- 10 Harter T, Muehlbrandt S, Ummethala S, et al. Silicon-plasmonic integrated circuits for terahertz signal generation and coherent detection. *Nat Photon*, 2018, 12: 625–633
- 11 Dorodnyy A, Salamin Y, Ma P, et al. Plasmonic photodetectors. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, 24: 1–13
- 12 Nagatsuma T, Ducournau G, Renaud C C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nat Photon*, 2016, 10: 371–379
- 13 Chen Z, Ma X, Zhang B, et al. A survey on terahertz communications. *China Commun*, 2019, 16: 1–35
- 14 Muehlbrandt S, Melikyan A, Harter T, et al. Silicon-plasmonic internal-photoemission detector for 40 Gbit/s data reception. *Optica*, 2016, 3: 741–747
- 15 Salamin Y, Ma P, Baeuerle B, et al. 100 GHz Plasmonic Photodetector. *ACS Photon*, 2018, 5: 3291–3297
- 16 Long M, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1803807
- 17 Novoselov K S. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, 306: 666–669
- 18 Xia F, Mueller T, Lin Y M, et al. Ultrafast graphene photodetector. *Nat Nanotech*, 2009, 4: 839–843
- 19 Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications. *Nat Photon*, 2010, 4: 297–301
- 20 Gan X, Shiue R J, Gao Y, et al. Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity. *Nat Photon*, 2013, 7: 883–887
- 21 Pospischil A, Humer M, Furchi M M, et al. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands. *Nat Photon*, 2013, 7: 892–896
- 22 Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nat Nanotech*, 2014, 9: 780–793
- 23 Schall D, Neumaier D, Mohsin M, et al. 50 Gbit/s photodetectors based on wafer-scale graphene for integrated silicon photonic communication systems. *ACS Photon*, 2014, 1: 781–784
- 24 Shiue R J, Gao Y, Wang Y, et al. High-responsivity graphene-boron nitride photodetector and autocorrelator in a silicon photonic integrated circuit. *Nano Lett*, 2015, 15: 7288–7293
- 25 Schuler S, Schall D, Neumaier D, et al. Controlled generation of a p-n junction in a waveguide integrated graphene photodetector. *Nano Lett*, 2016, 16: 7107–7112
- 26 Schall D, Porschatis C, Otto M, et al. Graphene photodetectors with a bandwidth >76 GHz fabricated in a 6" wafer process line. *J Phys D-Appl Phys*, 2017, 50: 124004
- 27 Cakmakypapan S, Lu P K, Navabi A, et al. Gold-patched graphene nano-strips for high-responsivity and ultrafast photodetection from the visible to infrared regime. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 1–9
- 28 Ni Z, Ma L, Du S, et al. Plasmonic silicon quantum dots enabled high-sensitivity ultrabroadband photodetection of graphene-based hybrid phototransistors. *ACS Nano*, 2017, 11: 9854–9862
- 29 Goykhman I, Sassi U, Desiatov B, et al. On-chip integrated, silicon-graphene plasmonic schottky photodetector with high responsivity and

- avalanche photogain. [Nano Lett](#), 2016, 16: 3005–3013
- 30 Ma P, Salamin Y, Baeuerle B, et al. Plasmonically enhanced graphene photodetector featuring 100 Gbit/s data reception, high responsivity, and compact size. [ACS Photon](#), 2018, 6: 154–161
- 31 Muench J E, Ruocco A, Giambra M A, et al. Waveguide-integrated, plasmonic enhanced graphene photodetectors. [Nano Lett](#), 2019, 19: 7632–7644
- 32 Ding Y, Cheng Z, Zhu X, et al. Ultra-compact integrated graphene plasmonic photodetector with bandwidth above 110 GHz. [Nanophotonics](#), 2020, 9: 317–325
- 33 Guo J, Li J, Liu C, et al. High-performance silicon-graphene hybrid plasmonic waveguide photodetectors beyond 1.55 μm . [Light Sci Appl](#), 2020, 9: 29
- 34 Ma Z, Kikunaga K, Wang H, et al. Compact graphene plasmonic slot photodetector on silicon-on-insulator with high responsivity. [ACS Photon](#), 2020, 7: 932–940
- 35 Huard B, Stander N, Sulpizio J A, et al. Evidence of the role of contacts on the observed electron-hole asymmetry in graphene. [Phys Rev B](#), 2008, 78: 121402
- 36 Freitag M, Low T, Xia F, et al. Photoconductivity of biased graphene. [Nat Photon](#), 2013, 7: 53–59
- 37 Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene. [J Appl Phys](#), 2008, 103: 064302
- 38 Hao Y, Wang Y, Wang L, et al. Probing layer number and stacking order of few-layer graphene by Raman spectroscopy. [Small](#), 2010, 6: 195–200
- 39 Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics. [Nat Photon](#), 2010, 4: 611–622
- 40 Leong W S, Gong H, Thong J T L. Low-contact-resistance graphene devices with nickel-etched-graphene contacts. [ACS Nano](#), 2014, 8: 994–1001
- 41 Wang L, Meric I, Huang P Y, et al. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. [Science](#), 2013, 342: 614–617
- 42 Franklin A D, Han S J, Bol A A, et al. Double contacts for improved performance of graphene transistors. [IEEE Electron Device Lett](#), 2011, 33: 17–19
- 43 Nelson L E, Zhang G, Birk M, et al. A robust real-time 100 G transceiver with soft-decision forward error correction. [J Opt Commun Netw](#), 2012, 4: B131
- 44 Chang F, Onohara K, Mizuochi T. Forward error correction for 100 G transport networks. [IEEE Commun Mag](#), 2010, 48: S48–S55

Graphene-on-plasmonic slot waveguide photodetector

WANG YiLun^{1†}, HUANG XinYu^{2†}, ZHOU De¹, YAN QiZhi¹, JIANG ZhiBin¹,
CHEN Liao¹, LI Xiang³, YE Lei^{1,2*} & ZHANG XinLiang^{1,2*}

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

³ Electrical Engineering Division, School of Engineering, University of Cambridge, Cambridgeshire CB31SE, UK

Integrated silicon-based plasmonic photodetectors have attracted more and more attention recently, due to their potential applications in THz bandwidth. In this paper, by utilizing a simplified two-step lithography process, the photoconductive detector is fabricated with the core structure of plasmonic slot waveguide in two symmetric metallic slabs as microwave electrodes to integrate with mechanically exfoliated graphene. The 3-dB bandwidth of the graphene-on-plasmonic slot waveguide photodetector is exceeded 120 GHz under the theoretical calculation, and the measured bandwidth is still beyond 70 GHz due to the lack of larger-bandwidth equipment. High-speed data reception is demonstrated for 72 Gbit/s NRZ and 64 Gbit/s PAM-4 signals with a BER below 15% soft-decision FEC threshold. Based on the enhanced interactions of light and graphene induced by the subwavelength confinement from the plasmonic structure, the responsivity of 0.13 A/W is achieved under the condition of the 7- μm long detection zone and the 0.4-V bias voltage. With the advantages of ultra-compact, high-speed, large-bandwidth and compatible with the CMOS process, our photodetector has the potential to be used in high-speed optical interconnection, terahertz transmission and terahertz communication.

photodetectors, plasmonics, graphene, photoconductive effect

PACS: 85.60.Gz, 71.36.+c, 78.66.-w, 73.50.Pz

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0157](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0157)