

中红外片上集成光电子综述 (特邀)

林宏焘, 孙博姝, 马 辉, 钟础宇, 巨泽朝

(浙江大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310063)

摘要: 信息技术的发展使得通讯波段集成光子技术在过去的几十年中被广泛重视并取得了突出进展, 目前已走向商业化, 这一技术的发展也激发了人们对于中红外波段 (2~20 μm) 片上光子集成的兴趣。中红外波段在空间光通信、热成像、物质探测分析等关乎国家发展、国防安全、民生改善等技术领域具有重要的应用前景。利用半导体工艺实现中红外光电子系统芯片小型化在尺寸、功耗以及大规模量产部署具有重大优势。因此, 发展中红外片上集成光电子技术具有重大意义。文中主要针对中红外波段片上集成的一些关键基础器件 (如: 调制器、探测器) 的突破性进展及代表性工作进行了回顾; 对各器件的种类、性能、参数及加工手段分别进行了较为全面的调研与比较; 同时, 也对器件的发展进程、亟待解决的问题以及对未来的展望进行了总结。

关键词: 中红外; 集成光子; 光学探测器

中图分类号: TN214; TN256; TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211111

Review of mid-infrared on-chip integrated photonics (*Invited*)

Lin Hongtao, Sun Boshu, Ma Hui, Zhong Chuyu, Ju Zezhao

(College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310063, China)

Abstract: With the development of information technology, integrated photonics at telecom band has caught broad attention, made outstanding progress in the past few decades, and has also been commercialized in recent years. The development of integrated photonics at the telecom band has also inspired people to be interested in integrated photonics at the mid-infrared (Mid-IR) band (2-20 μm). Mid-IR has promising potential in applications such as space optical communications, thermal imaging, material detection, and analysis, which is of vital significance in national development, national security, and improvement of people's welfare. Utilizing semiconductor fabrication processes, a miniature Mid-IR optoelectronic system integrated on a chip has superior advantages in terms of the device's size, power consumption, and mass production compared to conventional solutions. Therefore, it is meaningful to develop chip-scale Mid-IR photonics. In this review, the representative works and breakthroughs of fundamental integrated devices at Mid-IR wavelength including modulators and detectors in recent years were reviewed and evaluated. The classification, performance matrices, parameters, and fabrication methods of different kinds of devices were discussed and compared comprehensively. Meanwhile, the developing progress, unsolved problems, and prospects of integrated Mid-IR devices were analyzed.

Key words: Mid-IR; integrated photonics; optical sensor

收稿日期: 2021-12-25; 修订日期: 2022-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (61975179); 国家重点研发计划 (2019 YFB2203002)

作者简介: 林宏焘, 男, 研究员, 博士, 主要从事中红外光电子方面的研究。

0 引言

中红外光波段主要指的是波长为 2~20 μm 的电磁波段。由于该波段存在大气透明窗口,而物体热辐射及分子特征吸收峰也都位于该波段,因此中红外波段被广泛地应用于红外热成像观测、物质成分分析、自由空间通讯等领域,对于国计民生、国防安全等具有重要战略应用价值^[1-3]。然而,相比于可见光和近红外光,中红外光由于光子携带的能量更少,受热噪声的影响很大,探测、调制及发射器件常常需要低温冷却。目前大部分中红外系统都还是由台式设备组成。

近年来,通过发展硅基平台的集成光电子技术不仅为大批量制造低成本、高性能的光电子产品提供了可能,而且片上光电子器件还能够提供亚波长尺度的光限制,大幅提升光与物质的相互作用和信噪比(SNR)。此外,在尺寸、质量和功率(SWaP)以及稳健性方面,与组装元件的台式系统相比,集成光电子器件也具有非常大的优势。将集成光子器件及系统的工作波长扩展到中红外将作为一项颠覆性技术,为未来中红外光电子系统及应用提供重大发展机会。

但由于中红外片上系统目前还不成熟,需要使用非常规的加工流程和不成熟的材料,如:锗、金刚石硅、硫系材料或卤化物晶体。标准光学材料(如:氧化物玻璃和聚合物)由于在中红外波段是不透明的而无法被应用,而中红外波段器件的窄带隙半导体需要特殊衬底,如:切边 Si、InSb 或 CdZnTe,增大了研制中红外光电子器件的难度,也使生产成本明显偏高。

文中针对中红外集成光电子芯片中关键的调制器和探测器的最新进展进行了总结和回顾,分别对以上两种器件根据不同的工作机理进行了分类讨论,并对其核心指标性能及影响因素进行理论分析及预测。通过对各技术路径的调研,分析了器件的发展进程以及亟需解决的问题和挑战,并对调制器和探测器的未来发展进行了展望。

1 调制器及开关

光调制器是光子链路中至关重要的单元器件,可

以实现信号的开关、路由切换、数据加密、相敏探测等。在近红外通信波段,光调制器以及光开关的工作机制通常为以下几种:热光效应、电光效应(Pockels效应)、自由载流子色散效应、电吸收效应以及声光效应。以上的大多数效应在中红外波段依然可以发挥作用,但其调制性能会因波长变化而变化。此节通过已发表的中红外调制器以及开关器件的工作,分析基于不同调制机制的中红外波段器件的调制性能。文中主要关注硅基波导集成器件,而不探讨自由空间器件。

1.1 热光开关

热光器件利用材料的折射率随温度的变化进行工作,而热光系数反映了材料的折射率随温度的变化率。在一种材料的低损波长范围内,热光系数与波长的相关性较弱。因此,热光调制在中红外波段仍然是一种有用的调制机制。为了考察中红外波长对热光器件性能的影响,关注品质因素(Figure of Merit, FOM)指标。热光器件的质量因素定义为开关响应时间(t_r)与开光功耗(P_ϕ)乘积的倒数,该指标常被用来比较不同热光技术形式的性能。对于基于马赫-曾德尔干涉仪(Mach Zehnder Interferometer, MZI)的器件,FOM表示为^[4]:

$$FOM = \frac{1}{P_\phi t_r} = \frac{0.9n_g L}{\lambda C} \left(\frac{dn}{dT} \right)_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中: n_g 、 L 、 C 以及 $(dn/dT)_{\text{eff}}$ 分别为干涉仪波导的群折射率、加热区长度、加热区总集热电容以及有效热光系数。采用一阶近似进行分析, L 随着波长 λ 增大而增大,而 C 与 λ^3 成正比,因此, FOM 可粗略认为与 $1/\lambda^3$ 成正比,这是中红外波长需要更大体积的器件所导致的。在已报道的近红外器件中,慢光设计(大的群折射率)是一种可以有效提高FOM的手段^[5]。在基于谐振腔设计的热光开关中,FOM表示为^[4]:

$$FOM = \frac{1}{P_\phi t_r} = \frac{0.14Q}{C} \left(\frac{dn}{dT} \right)_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中: Q 为谐振腔的质量因子(Quality factor, Q -factor)。与MZI器件相似,基于谐振腔的FOM同样近似地与 $1/\lambda^3$ 成比例相关。然而,慢光效应在此类器件中影响

较小, 增大 Q 值则是提高性能的关键。

目前已有工作在 Ge-on-SOI^[6]、Silicon-on-sapphire^[7] 以及 SOI^[8] 平台上制备出中红外热光调制器件。图 1 (a) 为 Ge-on-SOI 器件^[6], 该器件基于 MZI 结构, 其中一臂的 Ge 波导一侧使用 Cr/Au 金属进行加热, 加热区长度为 210 μm , 波导下方的硅进行了镂空刻蚀, 避免因硅的高导热性而降低加热效率, 其工作在 5 μm 波段, π 相移功耗为 10 mW。图 1 (b) 展示了 Silicon-on-sapphire 平台的 MZI 热光调制器, MZI 两臂均引入光子晶体线缺陷结构, 使用 Au 作为加热电极, 功耗为 170 mW。图 1 (c) 为基于 SOI 的 MZI 热光开关^[8], 采用 Al 作为加热电极, MZI 的两臂均为螺旋型波导, 目的是增大

加热区长度, 同时最小化加热质量 C 。该器件实现了 47 mW 的开关功耗以及 20 kHz 的 3 dB 带宽, 相应的 FOM 为 $0.0012 \text{ mW}^{-1}\mu\text{s}^{-1}$ 。考虑到 $1/\lambda^3$ 的尺寸比例因子, 该 FOM 性能与近红外器件^[9] 的性能具有可比性, 通过引入慢光效应, 该器件性能可以得到进一步提升。在 2 μm 波段, 已有报道基于 2×2 MZI 结构的热光开关^[10], 使用 TiN 作为热电极, 功耗为 32.3 mW, 动态响应上升/下降沿为 15/15 μs , 因此相应的 FOM 为 $0.002 \text{ mW}^{-1}\mu\text{s}^{-1}$ 。基于 MZI 结构以及多模波导的 2 μm 波段双模式热光开关^[11] 功耗为 19.2 mW, 动态响应上升/下降沿为 9.2/13.2 μs , 因此相应的 FOM 为 $0.004 \text{ mW}^{-1}\mu\text{s}^{-1}$ 。其结构分别如图 1 (d)、(e) 所示。

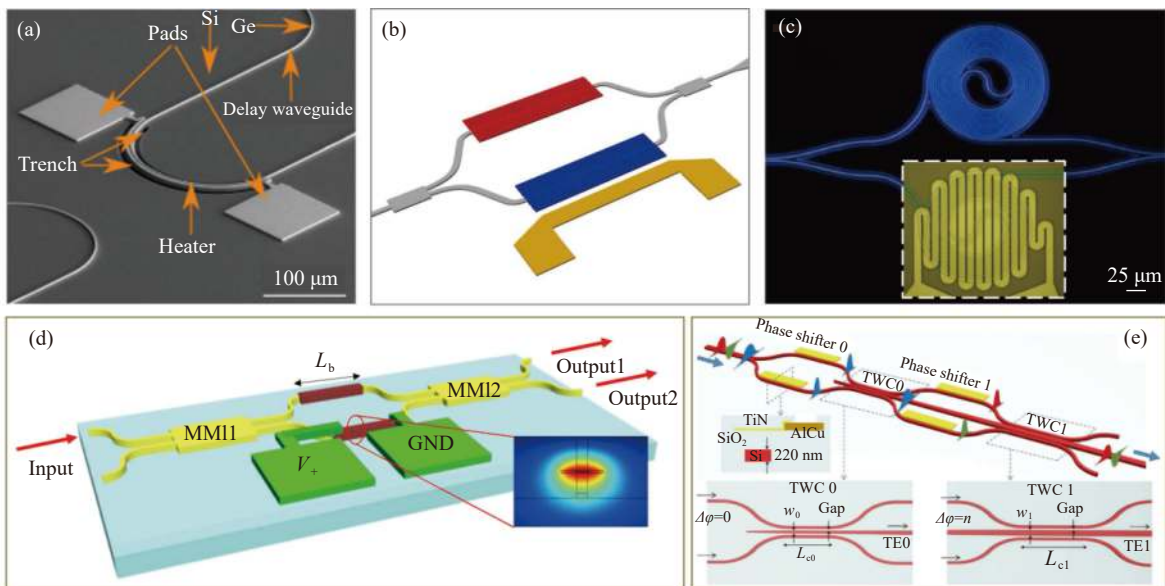


图 1 (a) Ge-on-SOI 热光调制器^[6]; (b) 光子晶体 Silicon-on-sapphire 热光调制器^[7]; (c) SOI 螺旋波导 MZI 热光调制器^[8]; (d) 2 μm 波段 2×2 MZI 热光开关^[10]; (e) 2 μm 波段 SOIMZI 双模式热光开关^[11]

Fig.1 (a) Thermo-optical (TO) modulator based on Ge-on-SOI waveguide platform^[6]; (b) Si-on-sapphire TO modulator with PhC (photonic crystal) waveguide^[7]; (c) TO modulator based on SOI with spiral waveguides arms. Inset shows the heater^[8]; (d) 2×2 MZI TO switch^[10]and; (e) Dual mode TO switch based on SOI MZI structure at 2 μm band^[11]

除了使用金属作为加热器, 热光开关可以利用波导本身作为加热器, 该技术方案在当前可以选择的是掺杂硅加热器的方案。该方案中, 加热区与光场叠加程度得到极大的提高, 其加热效率得到提升, 且热能直接通过硅传递, 速度加快, 响应时间也能得到降低。笔者课题组基于 SOI 平台制备了使用掺杂硅波导作为加热器的 2 μm 波段热光调制器^[12], 制备了 MZI

以及 MRR 两种类型的器件 (图 2 (a)、(d)), 性能远优于已报道的 2 μm 波段的硅基热光调制器。其中, MZI 型器件实现了 17 dB 的调制深度。如图 2 (b) 所示, 其调制效率为 0.17 nm/mW, π 相移功耗 25.21 mW。如图 2 (c) 所示, 响应时间为 3.49/3.46 μs , 为目前 2 μm 波段热光调制器件中的最短响应时间。最终可算得 FOM 为 $0.011 \text{ mW}^{-1}\mu\text{s}^{-1}$ 。关于 MRR 型器件, 由于其

Q 值较高, 谐振模式的半高宽为 0.22 nm, 因此其功耗低至 6.66 mW, 为目前已报道的 2 μm 波段热光器件中的最低值, 如图 2 (e) 所示。如图 2 (f) 所示, 该器件动态响应时间为 3.65/3.70 μs , 因此可算得 FOM 为

$0.0405 \text{ mW}^{-1}\mu\text{s}^{-1}$, 为目前已报道的 2 μm 波段热光调制器件的最高值。同时应该指出, 对于掺杂硅, 其自由载流子吸收在中红外波段与 λ^2 成正比^[13-15], 因此不适合向更长波长的中红外波段发展。

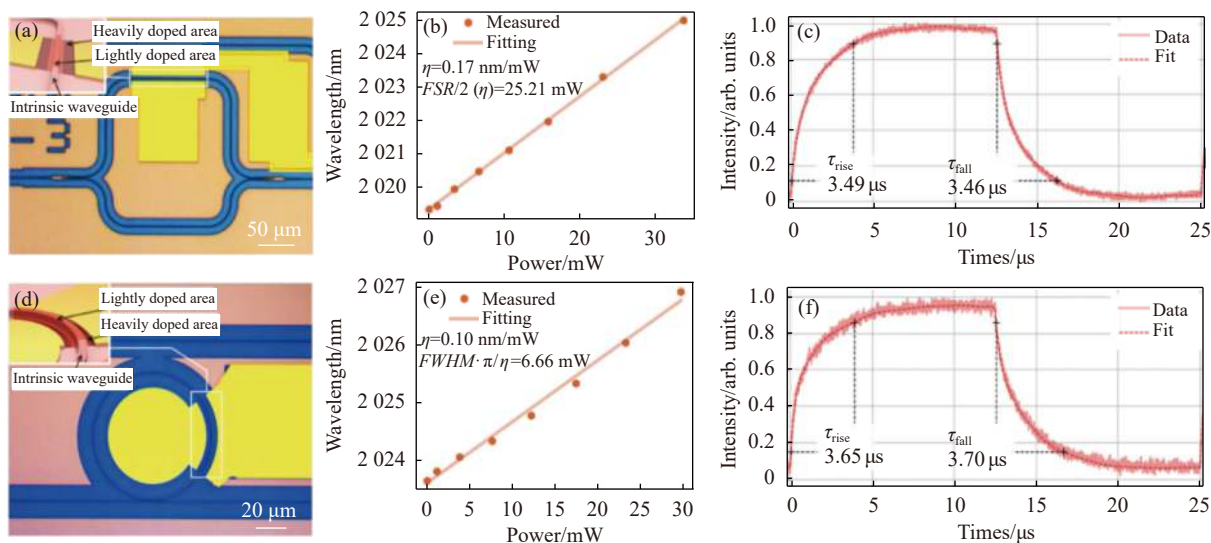


图 2 掺杂硅加热的热光调制器^[12]。MZI 型调制器的 (a) 显微镜图、(b) 静态性能、(c) 动态性能; MRR 型调制器的 (d) 显微镜图、(e) 静态性能、(f) 动态性能

Fig.2 Thermo-optic modulator with doped-silicon heater^[12]. (a) Microscope image, (b) the static response and (c) the dynamic response of the MZI modulator; (d) Microscope image, (e) the static response and (f) the dynamic response of the MRR-based modulator

1.2 基于 Pockels 效应的电光调制器

热光调制的响应时间为微秒量级, 相对较慢, 而电光效应的本质是基于电子的效应, 因此可以实现飞秒量级的超快响应。如前文所述, 常见的硅基材料 (如: Si、SiO₂ 以及 SiN_x) 缺少二阶非线性效应, 因此硅基电光调制器通常需要与其他材料进行异质集成。例如: 电光晶体 (如: LiNbO₃) 可以与硅进行混合键合, 实现 Pockels 效应调制。在近红外波段, LiNbO₃ 与 SOI 光子链路的集成已通过直接大面积键合的形式实现^[16](图 3 (a)), 也可以通过将 LiNbO₃ 薄膜与氧化硅基片键合, 然后制备 Ta₂O₅ 条形波导的方式实现集成^[17], 如图 3 (b) 所示。基于 Si-on-LiNbO₃ 平台的中红外调制可实现约 8 dB 的消光比, π 相移的电压长度积 ($V_{\pi} \cdot L$) 为 26 Vcm, 插损为 3.3 dB, 工作波长为 3.39 μm ^[18], 其器件结构及波导截面如图 3 (c) 所示。相同的技术可以在硅上集成中直接应用。

除了异质集成, 应力同样可以赋予硅一定的电光调制功能 (尽管与 LiNbO₃ 相比小得多)^[19-20]。尽管应变硅技术没有在中红外调制中被报道, 可以预计, 通信波段的应变硅架构可以应用于长波长器件中。

基于 Pockels 效应的电光调制器的潜在劣势是具有较高的 $V_{\pi} \cdot L$, 这意味着较大的器件体积 (cm³ 量级) 以及较大的驱动电压 (几十伏特)。若考虑波长相关性低的电光系数^[21], 分析可得, $V_{\pi} \cdot L$ 约与 λ^2 成比例。因为长工作波长要求器件体积增加, 导致工作电压也需要增大以维持同样的电场强度。相应的, 长波长器件的设计限制会更加严格。除此之外, 当前的器件设计所能工作的波长与电光晶体 (大多为氧化物) 的透明窗口是严格匹配的。有较强电光系数以及较宽红外透明窗口的新材料对于下一代中红外电光调制器至关重要。

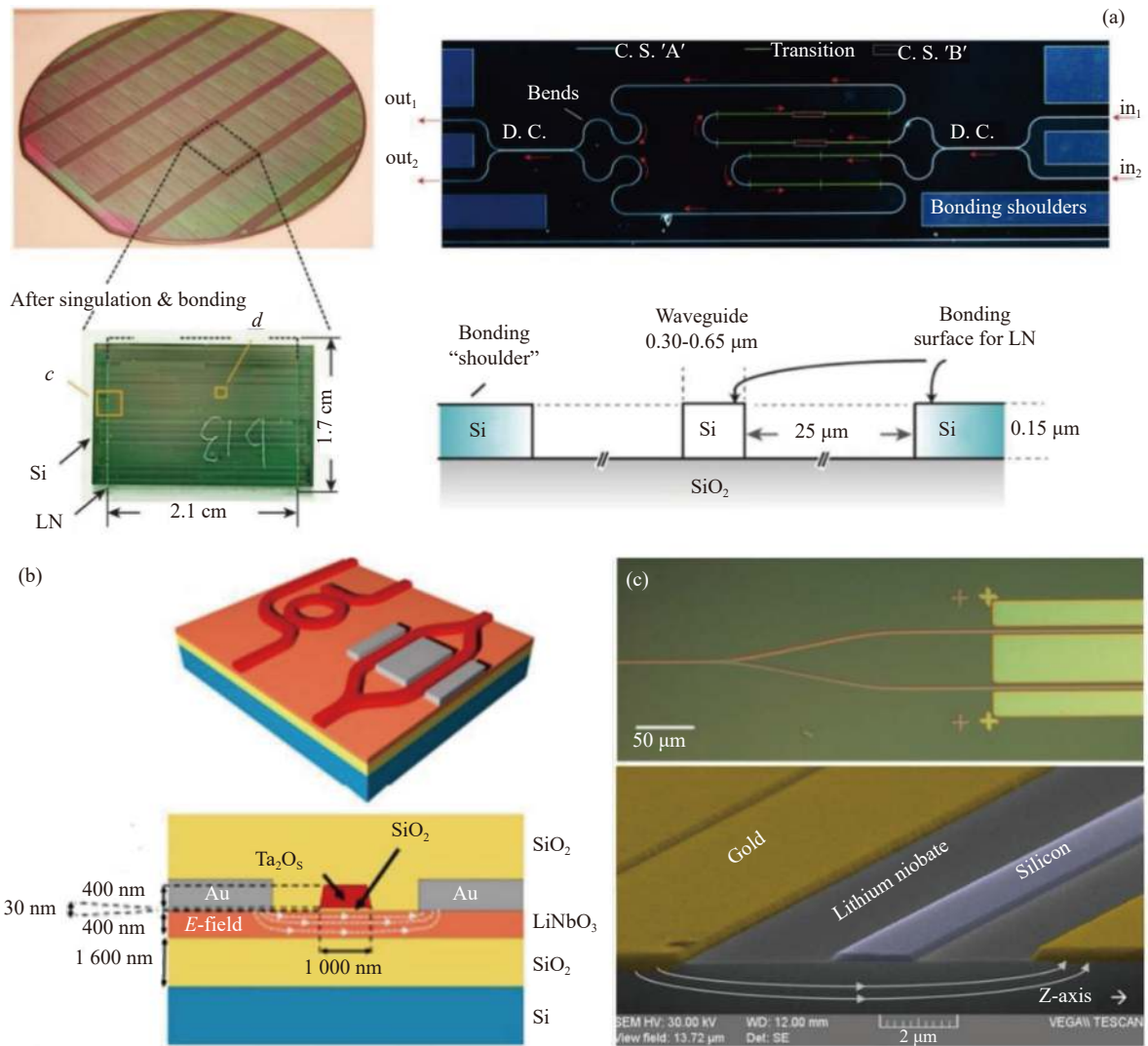


图 3 (a) LiNbO₃ 与硅光链路直接键合, 晶圆, 单元芯片, 基本光子链路及键合示意图^[16]; (b) LiNbO₃ 与 Ta₂O₅ 条形波导集成的电光调制器^[17]; (c) 基于 Si-on-LiNbO₃ 结构的中红外电光调制器^[18]

Fig.3 (a) Diagrams of silicon photonic circuits integrated with LiNbO₃ thin plate, wafer, single die and basic circuit and the cross-section illustration of bonding^[16]; (b) Integrated Ta₂O₅-LiNbO₃ rib waveguide^[17]; (c) Mid-infrared electro-optic modulator based on Si-on-LiNbO₃ waveguide^[18]

1.3 基于自由载流子色散效应的调制器

载流子色散效应是指波导中的自由载流子浓度变化同时导致材料的折射率以及光吸收发生改变, 因此会对相位以及强度产生调制。简单地, 自由载流子导致的折射率改变 (Δn) 以及自由载流子吸收 (Free Carrier Absorption, FCA, 反映在消光系数 Δk 中) 可用经典的 Drude 模型来表示:

$$\Delta n = -\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_e^*} + \frac{\Delta N_h}{m_h^*} \right) \quad (3)$$

$$\Delta k = -\frac{e^3 \lambda^3}{16\pi^3 c^3 \epsilon_0 n} \left(\frac{\Delta N_e}{m_e^{*2} \mu_e} + \frac{\Delta N_h}{m_h^{*2} \mu_h} \right) \quad (4)$$

式中: e 代表单电子电荷; ϵ_0 代表真空介电常数; n 为材料本身的折射率; ΔN 为载流子浓度改变量; m^* 表示载流子的有效质量; 下标 e 、 h 分别代表电子及空穴。

尽管 Drude 模型是较为简化的模型, 但仍可以帮助理解 λ 对该类调制器的影响。有两种调制模式充分利用了自由载流子效应: 一种为电光 (或电-折射率) 模式, 利用 Δn 实现相位调控; 另一种为电吸收模式, 利用 Δk 实现强度调制。两种模式中, 载流子注入或者抽离通常以 p-n 结或 Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) 结构的技术形式实现。若 p-n 结的掺杂分布或 MIS 的门介电层厚度保持不变, 则器件的单位面积电

容保持不变。该假设下,单位面积的电荷积累(或耗尽)在给定偏置电压下是固定的。再考虑 Δn 的 λ^2 相关性 (Δk 为 λ^3 相关),而且载流子积累区域与光波导模场的重叠程度与 $1/\lambda$ 正相关,该假设指明了关于波长的线性缩放特性,波导模式的有效折射率与 λ 线性相关(吸收率则与 λ^2 相关)。结论表明,电光调制器的 $V_\pi \cdot L$ 乘积几乎与波长无关。然而, $\Delta n/\Delta k$ (电光调制 FOM) 随着波长的增加而减小(与 $1/\lambda$ 正相关),说明插入损耗的增加阻碍了基于自由载流子的电光调制器在长波长下的有效工作。另一方面,基于 FCA 的电吸收调制器中红外波长有显著的性能优势,因为

在更长的波长下可以降低器件长度和驱动电压。

如图 4 所示, Nedeljkovic 等人给出了载流子效应对材料的折射率和消光系数的更详细的分析^[22-23], 揭示了研究实际的 Si 和 Ge 材料时 Drude 模型的不足。Drude 模型未考虑价带间跃迁,这在 p 型 Ge 中是很明显的过程。该模型也无法预测 10 μm 或更长波长以及载流子浓度大的情况下,自由载流子引起的指数变化和 FCA 的饱和过程。尽管如此,基于自由载流子效应的电光调制在 2~3 μm 之间仍然有效,而 FCA 效应更适合用于 3 μm 以上波长的中红外调制。

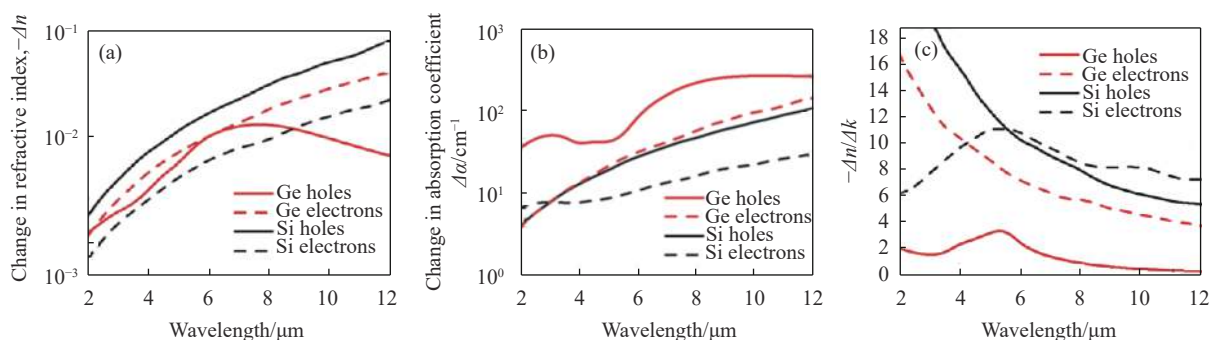


图 4 自由载流子引起中红外波段硅锗的 (a) 折射率、(b) 吸收系数变化以及 (c) $-\Delta n/\Delta k$ 的波长相关性^[23], 载流子浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Fig.4 Changes of (a) refractive index and (b) absorption coefficient of silicon and germanium in the Mid-IR caused by free carrier; (c) Wavelength scaling of $-\Delta n/\Delta k$ ^[23], the carrier concentration is fixed at $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

基于载流子效应的 2~2.5 μm 波段的电光型调制器和电吸收型调制器已在 SOI 器件中得到实现^[24-25]。

其中,电光型器件的器件形式可为 p-i-n 结(载流子注入型)及 p-n 结(结载流子耗尽型)。图 5 (a) 所示为工

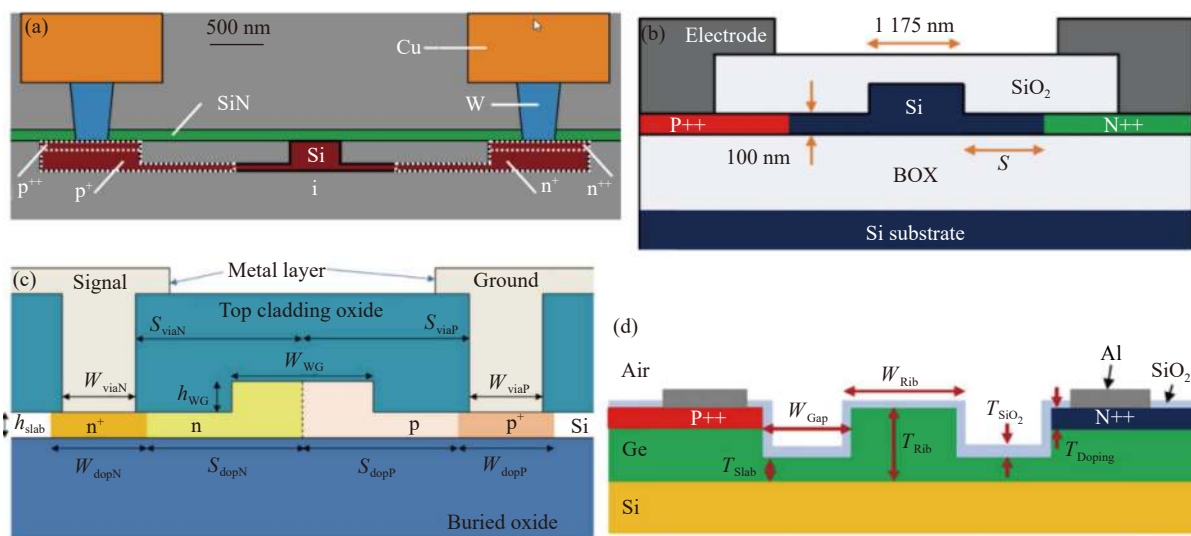


图 5 (a)、(b)SOI 载流子注入型^[24,26]及 (c) 载流子耗尽型调制器结构^[27]; Ge-on-Si 平台的 (d) 电光型调制器及电吸收型调制器结构^[28]

Fig.5 (a), (b) carrier-injection modulators^[24,26] and (c) carrier-depletion modulators based on SOI ^[27]; (d) Electro-optic modulator and electro-absorption modulator on Ge-on-Si ^[28]

作在 2.165 μm 波长的载流子注入型电光调制器,为防止硅波导被氧化,在硅波导有氧化硅覆盖层之间有一 SiN 保护层。该器件实现了极佳性能, $V_{\pi} \cdot L$ 低至 0.012 Vcm, 消光比高达 23 dB, 调制速度高达 3 Gb/s^[24]。图 5 (b) 所示同为载流子注入型电光调制器^[26], 硅波导上方直接与氧化硅覆盖层接触, 实现了极低的 $V_{\pi} \cdot L$ (0.0052 Vcm), 但所测的调制速度仅为 125 Mb/s。基于硅 p-n 结的流子耗尽型调制器可以在 2 μm 波段实现 20 Gb/s 的高速调制^[27], 其调制深度为 5.8 dB, $V_{\pi} \cdot L$ 为 2.62 Vcm。基于 Ge-on-Si 平台可实现工作在 3.8 μm 波段的电光型调制器^[28] 以及基于 FCA 效应的电吸收调制器^[28-29]。器件结构为脊型 Ge 波导, 如图 5 (d) 所示, 通过重掺 Ge 向本征 Ge 注入载流子, 电光型调制器实现了 2.62 Vcm 的 $V_{\pi} \cdot L$ 、13 dB 的调制深度以及 3.5 V 的工作电压; 电吸收型调制器可实现 35 dB 的调制深度, 但工作电压为 7 V, 两种工作机制均测试出 60 MHz 的调制带宽。另外, 基于 Ge-on-Si 平台的 FCA 效应的工作也有报道^[30]。

1.4 基于泡利阻塞或场致效应的电吸收调制器

此节讨论的调制机制包含两个类型: 一类为场致吸收, 如: Franz-Keldys 效应 (FKE) 和 Quantum Confined Stark 效应 (QCSE); 另一类为由于能带填充导致的吸收调制, 即泡利阻塞或 Burstein-Moss 漂移。

FKE 和 QCSE 中, 外加电场会造成半导体材料的吸收边发生偏移, 因此这些器件必然涉及用于中红外调制的窄隙半导体。例如: 基于 FKE 的 GeSn 调制器已得到理论上的研究^[31-32], 尽管尚未报告该类器件的实验验证。黑磷 (BP) 等窄间隙范德华固体是硅基中红外调制器的另一种选择。理论分析表明, BP 中的

光调制是基于量子限制 FKE 和泡利阻塞, 它们的相对大小取决于 BP 层厚度、掺杂、场强和波长^[33]。自由空间调制的工作最近已被报道, 光从器件表面垂直入射到 BP 薄片上^[34-35]。采用波导集成技术可以解决空间调制器作用长度较短而导致的调制消光比较小的问题 (仅几个百分比)。

石墨烯是一种极好的光电材料, 可利用能带填充导致的泡利阻塞进行电吸收调制。目前, 石墨烯波导集成调制器在 1550 nm 通信波段附近实现了优异性能, 包括 35 GHz 的 3 dB 带宽以及 70 dB/mm 的调制深度^[36]。首个中红外波段工作的石墨烯波导集成调制器是基于硫系波导实现的^[4], 器件结构包括 ChG 波导和两层石墨烯, 如图 6 (a) 所示。在该设计中, ChG 材料既充当光导介质, 又充当栅极电介质。石墨烯为 p 型掺杂, 在零偏压下, 由于泡利阻塞效应, 两者对中红外光都是透明的。当在栅极上施加偏压时, 两个石墨烯片之间的电荷转移会导致它们的费米能级向相反方向变化, 导致其中一层石墨烯由于泡利阻塞的条件不满足而开始出现光吸收。该原型器件在 2.05 μm 波长下表现出高达 8 dB/mm 的调制深度 (图 6 (b)), 与从表面导电模型 (图 6 (c)) 得出的理论预测非常吻合^[37]。

对该模型进行扩展, 笔者课题组研究了其在更长波长的工作性能^[38]。首先, 可以先得出不同波长下 TE 基模的关于不同石墨烯费米能级的光吸收系数, 如图 7 (a) 所示。图中右上角的零吸收区域表明泡利阻塞的发生。为了展现石墨烯的调制性能, 扩展模型使用类似图 7 (a) 所示的器件结构。其他假设包括: (1) 零偏压下石墨烯的起始费米能级与狄拉克点重

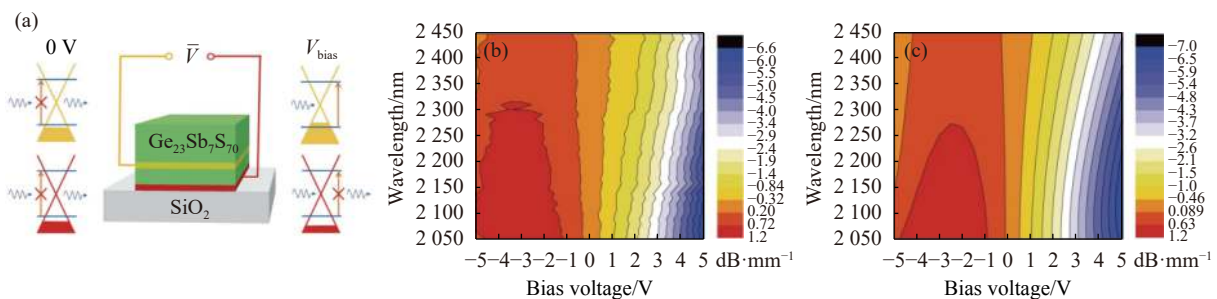


图 6 石墨烯硫系波导电光调制器^[4]。(a) 中红外石墨烯波导调制器结构和原理; (b) 实测及 (c) 理论计算的调制深度与波长及偏压的关系 (单位: dB/mm)

Fig.6 Graphene-chalcogenide modulator^[4]. (a) The structure and working principle of the graphene Mid-IR waveguide modulator; (b) Measured and (c) simulated modulation depth of the device versus wavelength and bias (Unit: dB/mm)

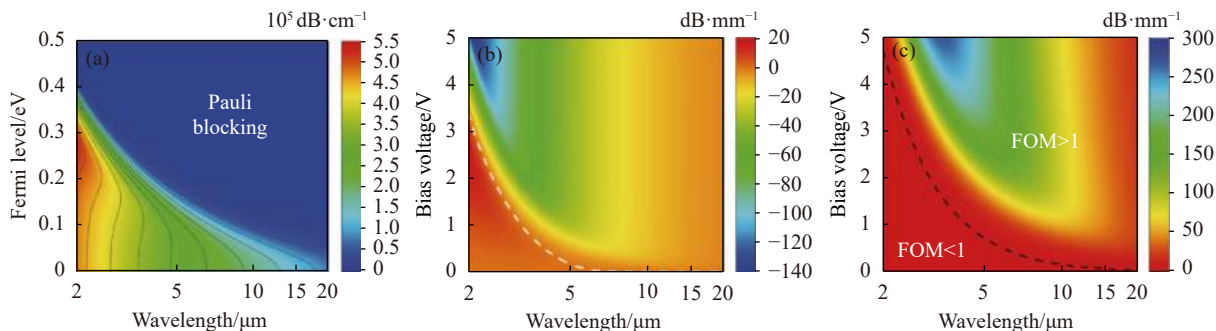


图 7 中红外石墨烯电光调制器理论性能^[38]。(a) 面电导模型计算的石墨烯吸收系数与波长以及费米能级的关系; (b) 中红外石墨烯电吸收调制器调制深度仿真结果, 白色虚线为 0 dB 等值线; (c) 调制器 FOM(调制深度/插入损耗), 黑色虚线为 1 等值线

Fig.7 Performance of Mid-IR graphene-chalcogenide modulators^[38]. (a) The Fermi-level-related optical absorption of a graphene layer across the Mid-IR band evaluated by the surface conductive model; (b) Simulation result of modulation depth for graphene mid-IR electro-absorption modulators (The white dashed line is zero modulation depth); (c) FOM (modulation depth/insertion loss) of the modulator (The black dashed line represents unity FOM)

合; (2) 选择 20 nm 的 AMTIR-6 (As_2S_3) 硫系玻璃层作为栅极材料, 与传统氧化物栅极相比, 其中红外波段的透明度窗口要宽很多; (3) 石墨烯的波导模式的限制因子 Γ 与 $1/\lambda$ 成正比, 并由定量给出 $\Gamma=0.0034/\lambda$ (以 μm 为单位)。模拟的调制深度和电吸收调制 FOM(定义为调制深度与插入损耗的比率) 分别绘制在图 7 (b)、(c) 中。可以得出两个明显的结论: (1) 工作在较短波长的调制器需要更高的偏置电压, 因为需要更大的 Femi 能级调控来产生泡利阻塞; (2) 调制深度和 FOM 都随着波长的增加而降低。对于 $\lambda>10 \mu m$ 的情况, 由于单层石墨烯中的模式限制降低, 调制深度下降到小于 10 dB/mm 并在 $\lambda=20 \mu m$ 处下降到 2.6 dB/mm。为了补偿不断减小的调制深度, 长波红外石墨烯调制器不可避免地需要较大的器件占用空间, 这在 $\lambda>10 \mu m$ 时变得不切实际, 或者需要多层石墨烯结构以增加石墨烯与光场的空间重叠, 以增强其与光场的相互作用。

1.5 小结及展望

综上所述, 中红外片上调制可以采用多种调制机制, 每种机制针对特定的应用场景都有其优缺点。笔者关于波长缩放的分析揭示了一个值得注意的趋势: 对于大多数调制器技术(热光、Pockels、自由载流子电光和石墨烯电吸收), 它们的关键性能指标会随着波长变长而降低。这是中红外调制器设计的一个需要着重考虑的因素。唯一的例外是基于自由载流子的电吸收调制器, 因为 FCA 效应随着波长的增加(在

饱和发生之前) 而增强, 可预测其将成为一种性能优异的长波红外光操控技术。

2 波导集成探测器

光电探测器能够将光信号转换为电信号, 是集成光电子系统的重要组成部分。中红外自由空间探测器和焦平面阵列的相关基础理论和最新进展已经在一些专题论文和综述文章中报道^[39-42]。此节着重讨论中红外波导集成光电探测器的相关内容。

波导集成的结构形式有许多性能优势。第一, 波导集成可以抑制噪声从而提高信噪比。这是由于影响信噪比的一系列噪声(如: 散粒噪声、约翰逊噪声和产生-复合噪声) 通常和探测器的有效探测面积成线性比例关系^[39]。不同于自由空间的探测器(光从自由空间输入), 波导集成探测器的光通过波导(尺寸系数 n) 输入时, 探测器的有效区域可以在不影响光吸收的情况下减少约 n^2 倍, 噪声也将线性同比缩小。在中红外探测领域, 通常采用窄带隙半导体作为探测材料, 而窄带隙半导体通常自身噪声较高, 此时降低噪声至关重要。第二, 相比于自由空间探测器, 波导集成能够达到更高的带宽^[43]。简单来说, 在光伏效应主导的探测器中, 随着探测器体积的减小, 器件的 RC 时延和载流子渡越时间也降低了。第三, 波导集成探测器结构特点解除了光吸收效率和载流子收集效率的相互制约, 这是当前大多数自由空间探测器难以避免的问题^[43]。量子效率需要足够大的光吸收

长度来完全吸收入射光子,而高效的载流子收集则需要较短的载流子传输路程,以提高光电探测器的量子效率和传输时间限制带宽(光伏探测器),或提高光电导增益(光电导探测器)。自由空间探测器的光传输路径和载流子收集路径通常是重合的,而波导集成探测器这两个路径是相互垂直的,从而避免了两者的相互制约。

在中红外光谱范围已经报道了四类波导集成探测器,按有源探测材料组成分类:(1)混合键合窄带隙

半导体;(2)单片沉积或生长窄带隙半导体;(3)窄带隙范德瓦尔斯半导体或半金属;(4)离子掺杂硅引入带隙。表 1 中对比了这些形式的波导集成探测器。需要指出的是,通过噪声等效功率(NEP)来表征信噪比,代替比探测率(D^*)。对于自由空间探测,信噪比与探测器面积的平方根成比例,而在波导集成探测器中,光信号通过波导传输到探测器,因此与探测器面积的平方根的比例关系(根据 D^* 的定义)不再成立。

表 1 基于不同光敏材料的硅异质集成探测器

Tab.1 Hybrid integrated photodetectors with different active materials on silicon

Type	Active material	Wavelength/ μm	Responsivity/ $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$	3 dB bandwidth/ Hz	Room temperature NEP/ $\text{pW}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ^a	Reference
Heterogeneous integrated semiconductors	GaInAsSb on GaSb	2.3	1.4	N/A	0.54	[44-46]
	MQW on InP	2.35	1.6	N/A	0.035	[47-48]
	InAsSb on GaSb	3.8	0.3	N/A	56	[49]
Monolithically integrated semiconductors	PbTe	2.1-2.5	1.0	N/A	0.69	[50]
2-D Van der Waals materials	Graphene/Si junction	2.75	0.13	N/A	0.36 ^b	[51]
	Graphene	2.05	0.25	N/A	99	[4]
	Black phosphorus	3.8	11.31	0.55 K	12	[52]
Ion-implanted silicon	Si ⁺ implated Si	2.2-2.3	0.01	1.7 G	12.7 ^c	[53]
	Zn ⁺ implanted Si	2.2-2.4	0.09	1.7 G	11.2	[54]
	Ar ⁺ implanted Si	2.2-2.3	0.021	N/A	2.2	[55]
	B ⁺ implanted Si	1.96-2.5	0.3	15	165	[56]
	S ⁺ implated Si	3.36-3.74	0.002 2	N/A	1 000	[57]

^a在光电导器件或零偏下光电二极管,基本的噪声源是约翰逊噪声,通过器件的电阻进行计算。在施加偏置的光电二极管中,噪声通常由散粒噪声主导,通过暗电流计算表征。

^b在计算石墨烯器件中的散粒噪声时,假定Fano因子为1/3。

^c在离子掺杂的硅探测器中,由于器件之间存在较大的性能偏差(尤其是暗电流),提到的指标(响应度、带宽和NEP)通常是不同器件测试的结果,所以表中列出的是每个指标的最佳值。

制备异质集成探测器的工艺和异质集成激光器是相似的。从表 1 中可以看出,异质集成的 III-V 探测器由于其优良的材料性能,在响应度和信噪比等性能方面具有显著的优势,在设计光子系统中是不错的选择。

激光器要求材料满足直接带隙,较小的俄歇速率常数和较小的缺陷态密度来抑制无辐射等条件,而探测器对光敏材料的要求要低得多。对于小尺寸的波导集成探测器有着高效的载流子收集和噪声抑制,尽管目前单片集成到硅上面的材料还存在一些问题,但是单片集成的波导集成探测器还是具有很大的竞争优势,同时还有显著简化集成工艺的额外优势。多晶铅盐单片集成的中红外探测器探测波长能达到 5 μm ,

它们可以通过热蒸发或溶液处理的非外延方法沉积到硅上面^[58-60],作为一类多晶半导体的代表,由于多晶形态晶界附近载流子的分离,有着较长的光生载流子寿命。因此,多晶形态在红外探测方面可以与单晶形态竞争,甚至优于单晶形态^[61-62]。例如:集成在 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 硫系波导上的 PbTe 探测器^[50]。整个波导探测器结构在小于 200 $^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下使用简单的 CMOS 兼容光刻和剥离工艺沉积和制备^[63]。单片集成的 PbTe 探测器阵列组成的 CMOS 读出电路也已被报道^[64]。除了铅盐外,还有其他有望用于单片集成中红外探测的材料,如: GeSn^[65] 和胶体量子点^[66]。

另一种类型是基于硅的单片集成探测器。硅的带隙是 1.12 eV,在中红外波段是透明的,但是可以通

过引入掺杂或者制造晶格缺陷引入中间态使得硅在中红外波段有光吸收。利用从浅杂质掺杂状态到导带或价带电子跃迁的低温冷却非本征 Si 和 Ge 探测器,特别是受阻杂质带 (BIB) 探测器,已经普遍用于中红外和远红外传感^[41]。利用 B 和 S 掺杂引入较深能级,使得 B 和 S 掺杂的 SOI 探测器能够在室温下工作^[56-57]。离子注入能够产生光学主动陷阱态的晶格缺陷,如:双空位, Si⁺和 Ar⁺掺杂的 SOI 波导探测器就属于这一类^[53-55]。这类探测器制备工艺完全与标准

CMOS 工艺兼容,不需要引入硅光平台外的任何材料。由于比较弱的外部掺杂或缺陷能级较少的光吸收,这类探测器有着比较弱的响应度。图 8 显示了基于 SOI 波导 B 离子的 p-i-n 导,高偏置电压使器件工作在雪崩状态下,能够显著提升其响应度,但是同时会增大探测器的噪声^[56]。通过脉冲激光融化,将硫掺入硅中,能够引入很强的中间带隙吸收,但是同时会引入过多的暗电流和噪声,所以高效室温下工作的中红外探测器前景还不明朗^[67-68]。

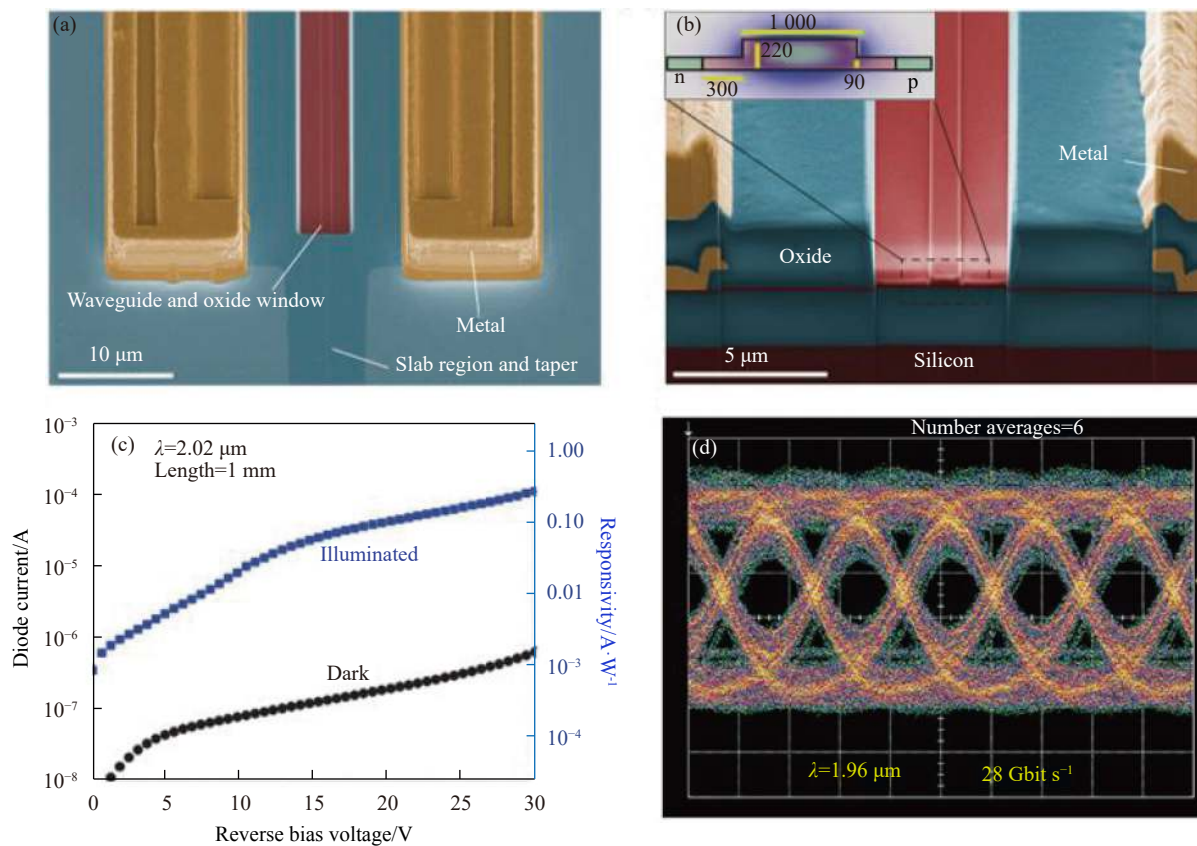


图 8 中红外非本征硅探测器。(a)B 掺杂 SOI 探测器;(b)SEM 获得同一器件的截面图(插图:硅波导示意图);(c)探测器的反向偏置电压与光电流/响应度的关系;(d)探测器在反向偏置电压 27 V 下的眼图^[56, 69]

Fig.8 Mid-IR extrinsic silicon photodetectors. (a) B doped SOI detector; (b) SEM of the same device (Inset: Schematic diagram of a silicon waveguide); (c) Relationship between the reverse bias voltage and the photocurrent/response of the detector at two micron wavelength range; (d) Eye diagram of the detector with voltage of 27 V^[56, 69]

二维范德华材料的出现为基于硅的中红外光电探测提供了另一种探测方案。石墨烯由于其零带隙,表现出了超宽带隙光吸收。由于零带隙导致较大的暗电流、较短的载流子寿命和较差的 NEP。通过形成石墨烯和异质结间的异质结^[51]或用窄带隙二维半导体(例如:黑磷^[52, 70]、黑砷磷^[68, 71]和碲烯^[72-73])来代

替石墨烯可以解决这个问题。如图 9 所示,集成在硅波导上的黑磷探测器实现了 $12 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 的 NEP,同时结合光子晶体结构慢光效应特性,提高探测器响应度到 11.31 A/W 。到目前为止,在无金属催化剂的情况下,大多数二维材料在硅或介质衬底上的大面积生长仍然是一个重要的技术障碍,因此目前在硅上集

成这些材料必须借助于混合转移过程。同时,在近红外有响应的二维材料 MoS₂ 已经在蓝宝石衬底上实现大面积生长^[74]。所以对于窄带隙二维材料,能够成功

将材料转移纳入标准 CMOS 兼容的后端工艺中或开发出新技术实现硅上单片集成二维材料。

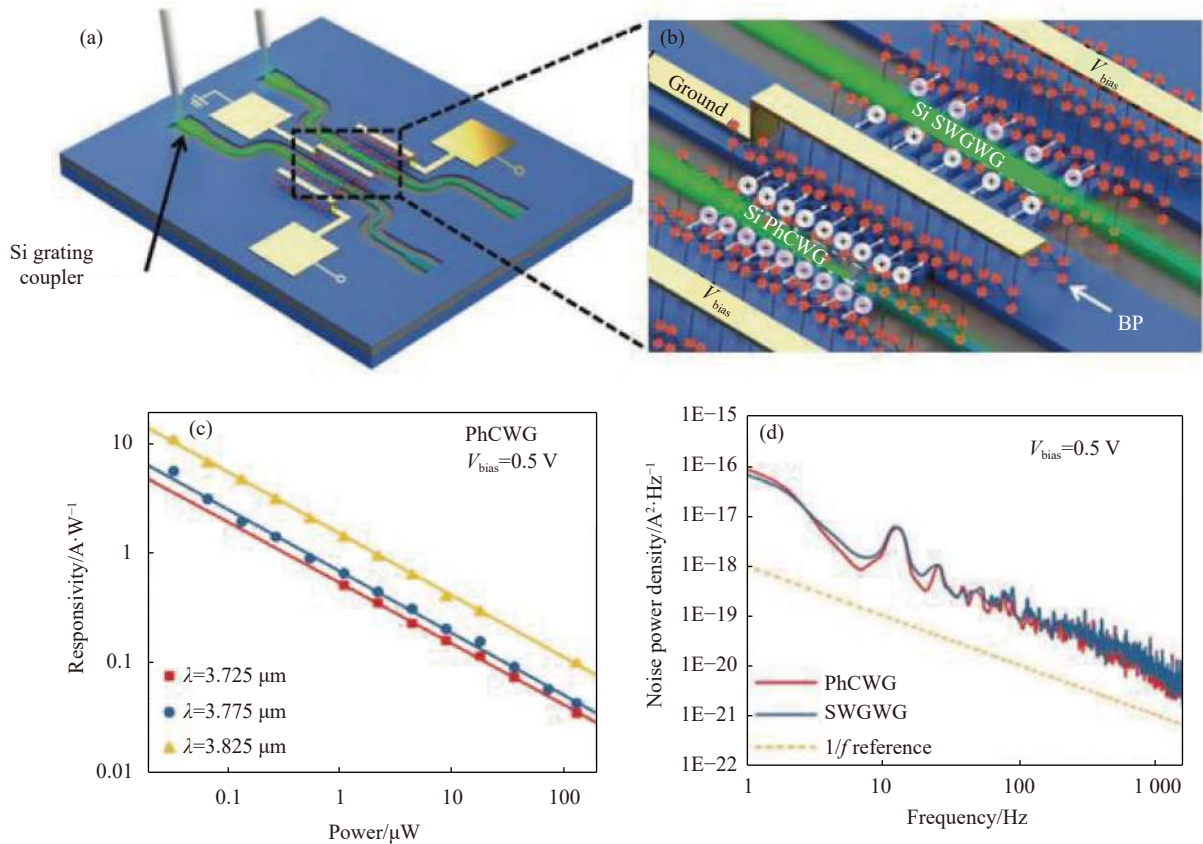


图 9 中红外黑磷探测器。(a)~(b) 黑磷硅基慢光集成探测器结构;(c) 三种不同波长下黑磷探测器功率与响应度的关系;(d) 分别在亚波长光栅波导和光子晶体波导的黑磷光电探测器电流噪声功率密度^[52]

Fig.9 Mid-infrared Black Phosphorus(BP) detector. (a)-(b) Structure of the silicon-based BP slow-light integrated detector; (c) Relationship between the power and the responsivity of the BP detector at three different wavelengths; (d) Current noise power density of the photonic crystal waveguide and the subwavelength grating waveguide BP photodetectors, respectively^[52]

除上文提到的直接探测方法外,还可以利用非线性频率变频实现间接中红外探测。在这种方法中,入射的中红外光和泵浦光同时非线性波导中传输,通过四波混频(四波混频)在近红外区域产生一个惰性波,然后使用近红外探测器监测惰性波。理论表明,在适当的条件下,间接探测的方法可以提高信噪比,因为近红外探测器通常比中红外探测器具有更高的信噪比^[75-76]。这种中红外-近红外光谱转换(从 2.44 μm 到 1.62 μm)已经在 SOI 波导中得到了实验验证^[76]。一种分子光力纳米腔连续波频率上转换实现中红外探测的方式最近被报道^[77],实现了探测极限可以达到亚微瓦级别,响应速度(上升时间)为千亿分之一秒。在

低功率下实现频率转换,提出了新方法,解决了需要高功率脉冲源来实现高效的脉冲转换限制,为片上集成频率转换中红外光探测的发展和应提供了新思路。

3 总 结

中红外波段器件是硅上光子集成的新前沿,文中讨论了近几年的工作成果。尽管过去几年取得了重大进展,但与近红外相比,器件普遍不成熟,且工作波长范围受限,可见中红外仍有许多挑战亟待解决。多材料集成能显著提升调制器或探测器的性能,已经成为了推动领域进步的关键驱动力,并且将继续在应对未来的挑战中发挥重要作用。此外,从优化单个光子

器件到系统级集成的转变代表了中红外光子学的重大机遇。利用现有技术已经可以实现成熟的、芯片级性能的、达到先进水平的中红外光子系统。相信未来十年,随着新材料集成技术的成熟,集成中红外光模块将成为现实。

参考文献:

- [1] Pile D, Horiuchi N, Won R, et al. Extending opportunities[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 407.
- [2] Soref R A, Emelett S J, Buchwald W R. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(10): 840-848.
- [3] Hu J, Meyer J, Richardson K, et al. Feature issue introduction: mid-IR photonic materials[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1571.
- [4] Lin H, Song Y, Huang Y, et al. Chalcogenide glass-on-graphene photonics[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 798-805.
- [5] Vlasov Y A, O'boyle M, Hamann H F, et al. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 65-69.
- [6] Malik A, Dwivedi S, Landschoot L V, et al. Ge-on-Si and Ge-on-SOI thermo-optic phase shifters for the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28479-28488.
- [7] Zou Y, Chakravarty S, Chung C J, et al. Miniature mid-infrared thermooptic switch with photonic crystal waveguide based silicon-on-sapphire Mach-Zehnder interferometers [C]//Proceedings of the Optical Interconnects XVI, 2016.
- [8] Nedeljkovic M, Stankovic S, Mitchell C J, et al. Mid-infrared thermo-optic modulators in Si [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(13): 1352-1355.
- [9] Campenhout J V, Green W M J, Assefa S, et al. Integrated NiSi waveguide heaters for CMOS-compatible silicon thermo-optic devices[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 1013-1015.
- [10] Shen L, Huang M, Zheng S, et al. High-performance silicon 2×2 thermo-optic switch for the 2- μm wavelength band[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-6.
- [11] Shen W, Du J, Xu K, et al. On-chip selective dual-mode switch for 2- μm wavelength high-speed optical interconnection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(10): 483-486.
- [12] Zhong C, Ma H, Sun C, et al. Fast thermo-optical modulators with doped-silicon heaters operating at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23508-23516.
- [13] Sturm J C, Reaves C M. Fundamental mechanisms and doping effects in silicon infrared absorption for temperature measurement by infrared transmission[J]. *Rapid Thermal and Related Processing Technique*, 1990, 1393: 309-315.
- [14] Isenberg J, Warta W. Free carrier absorption in heavily doped silicon layers[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(13): 2265-2267.
- [15] Schmid P E. Optical absorption in heavily doped silicon[J]. *Physical Review B*, 1981, 23(10): 5531-5536.
- [16] Weigel P O, Savanier M, Derose C T, et al. Lightwave circuits in lithium niobate through hybrid waveguides with silicon photonics[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22301.
- [17] Rabiei P, Ma J, Khan S, et al. Heterogeneous lithium niobate photonics on silicon substrates[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25573-25581.
- [18] Chiles J, Fathpour S. Mid-infrared integrated waveguide modulators based on silicon-on-lithium-niobate photonics[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 350-355.
- [19] Jacobsen R S, Andersen K N, Borel P I, et al. Strained silicon as a new electro-optic material[J]. *Nature*, 2006, 441(7090): 199-202.
- [20] Chmielak B, Waldow M, Matheisen C, et al. Pockels effect based fully integrated, strained silicon electro-optic modulator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17212-17219.
- [21] Mishra J, Mckenna T P, Ng E, et al. Mid-infrared nonlinear optics in thin-film lithium niobate on sapphire[J]. *Optica*, 2021, 8(6): 921-924.
- [22] Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G Z. Free-carrier electrorefraction and electroabsorption modulation predictions for silicon over the 1-14- μm infrared wavelength range[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1171-1180.
- [23] Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G Z. Predictions of free-carrier electroabsorption and electrorefraction in Germanium[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-14.
- [24] Van Camp M A, Assefa S, Gill D M, et al. Demonstration of electrooptic modulation at 2165 nm using a silicon Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28009-28016.
- [25] Thomson D J, Shen L, Ackert J J, et al. Optical detection and modulation at 2 μm -2.5 μm in silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10825-10830.
- [26] Nedeljkovic M, Littlejohns C G, Khokhar A Z, et al. Silicon-on-insulator free-carrier injection modulators for the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 915-918.
- [27] Cao W, Hagan D, Thomson D J, et al. High-speed silicon modulators for the 2 μm wavelength band[J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1055-1062.

- [28] Li T, Nedeljkovic M, Hattasan N, et al. Ge-on-Si modulators operating at mid-infrared wavelengths up to 8 μm [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8): 828-836.
- [29] Li T, Nedeljkovic M, Hattasan N, et al. Mid-infrared Ge-on-Si electro-absorption modulator [C]/Proceedings of the IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2017.
- [30] Shen L, Healy N, Mitchell C J, et al. Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 268-271.
- [31] Soref R A, Sun G, Cheng H H. Franz-Keldysh electro-absorption modulation in germanium-tin alloys[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(12): 19957-19965.
- [32] Zhang Q, Liu Y, Yan J, et al. Theoretical investigation of tensile strained GeSn waveguide with Si_3N_4 liner stressor for mid-infrared detector and modulator applications[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7924-7932.
- [33] Lin C, Grassi R, Low T, et al. Multilayer black phosphorus as a versatile mid-infrared electro-optic material[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(3): 1683-1689.
- [34] Whitney W S, Sherrott M C, Jariwala D, et al. Field effect optoelectronic modulation of quantum-confined carriers in black phosphorus[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 78-84.
- [35] Peng R, Khaliji K, Youngblood N, et al. Mid-infrared electro-optic modulation in few-layer black phosphorus[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6315-6320.
- [36] Dalir H, Xia Y, Wang Y, et al. A thermal broadband graphene optical modulator with 35 GHz speed[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1564-1568.
- [37] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(6): 19912.
- [38] Lin H T, Luo Z Q, Gu T, et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: A perspective[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(2): 393-420.
- [39] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [40] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(3): 136-154.
- [41] Rogalski A. Progress in focal plane array technologies[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(2-3): 342-473.
- [42] Kinch M A. State-of-the-Art Infrared Detector Technology [M]. US: SPIE, 2014.
- [43] Ahn D. Intrachip clock signal distribution via si-based optical interconnect[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [44] Hattasan N, Gassenq A, Cerutti L, et al. Heterogeneous integration of GaInAsSb p-i-n photodiodes on a silicon-on-insulator waveguide circuit[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(23): 1760-1762.
- [45] Gassenq A, Hattasan N, Cerutti L, et al. Study of evanescently-coupled and grating-assisted GaInAsSb photodiodes integrated on a silicon photonic chip[J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11665-11672.
- [46] Ryckeboer E, Gassenq A, Muneeb M, et al. Silicon-on-insulator spectrometers with integrated GaInAsSb photodiodes for wide-band spectroscopy from 1510 to 2300 nm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6101-6108.
- [47] Wang R, Sprengel S, Muneeb M, et al. 2 μm wavelength range InP-based type-II quantum well photodiodes heterogeneously integrated on silicon photonic integrated circuits[J]. *Opt Express*, 2015, 23(20): 26834-26841.
- [48] Wang R, Muneeb M, Sprengel S, et al. III-V-on-silicon 2-microm-wavelength-range wavelength demultiplexers with heterogeneously integrated InP-based type-II photodetectors[J]. *Opt Express*, 2016, 24(8): 8480-8490.
- [49] Muneeb M, Vasiliev A, Ruocco A, et al. III-V-on-silicon integrated micro - spectrometer for the 3 μm wavelength range[J]. *Opt Express*, 2016, 24(9): 9465-9472.
- [50] Han Z, Singh V, Kita D, et al. On-chip chalcogenide glass waveguide-integrated mid-infrared PbTe detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(7): 279-308.
- [51] Wang X, Cheng Z, Xu K, et al. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 888-891.
- [52] Ma Y, Dong B, Wei J, et al. High - responsivity mid - infrared black phosphorus slow light waveguide photodetector[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(13): 2000337.
- [53] Souhan B, Grote R R, Chen C P, et al. Si (+)-implanted Si-wire waveguide photodetectors for the mid-infrared[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 27415-27424.
- [54] Grote R R, Souhan B, Ophir N, et al. Extrinsic photodiodes for integrated mid-infrared silicon photonics[J]. *Optica*, 2014, 1(4): 264-267.
- [55] Souhan B, Chen C, Lu M, et al. Ar+-implanted Si-waveguide photodiodes for mid-infrared detection[J]. *Photonics*, 2016, 3(3): 46.
- [56] Ackert J J, Thomson D J, Shen L, et al. High-speed detection at two micrometres with monolithic silicon photodiodes[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 393-396.
- [57] Fain R, Miller S A, Yu M. CMOS-compatible Mid-Infrared

- Silicon Detector [C]//CLEO: Science and Innovations Optical Society of America, 2017.
- [58] Wang J, Hu J, Becla P, et al. Resonant-cavity-enhanced mid-infrared photodetector on a silicon platform[J]. *Opt Express*, 2010, 18(12): 12890-12896.
- [59] Wang J, Zens T, Hu J, et al. Monolithically integrated, resonant-cavity-enhanced dual-band mid-infrared photodetector on silicon[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(21): 211106.
- [60] Heves E, Ozturk C, Ozguz V, et al. Solution-based PbS photodiodes, integrable on ROIC, for SWIR detector applications[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2013, 34(5): 662-664.
- [61] Wang J, Hu J, Sun X, et al. Structural, electrical, and optical properties of thermally evaporated nanocrystalline PbTe films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(5): 053707.
- [62] Wang J, Hu J, Becla P, et al. Room-temperature oxygen sensitization in highly textured, nanocrystalline PbTe films: A mechanistic study[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(8): 14-26.
- [63] Hu J, Tarasov V, Carlie N, et al. Si-CMOS-compatible lift-off fabrication of low-loss planar chalcogenide waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 11798-11807.
- [64] Wang Jianfei. Resonant-cavity-enhanced multispectral infrared photodetectors for monolithic integration on silicon[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [65] Li H, Brouillet J, Salas A, et al. Low temperature growth of high crystallinity GeSn on amorphous layers for advanced optoelectronics[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1385-1396.
- [66] Lhuillier E, Keuleyan S, Zolotavin P, et al. Mid-infrared HgTe/As₂S₃ field effect transistors and photodetectors[J]. *Adv Mater*, 2013, 25(1): 137-141.
- [67] Simmons C B, Akey A J, Mailoa J P, et al. Enhancing the infrared photoresponse of silicon by controlling the fermi level location within an impurity band[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(19): 2852-2858.
- [68] Berencen Y, Prucnal S, Liu F, et al. Room-temperature short-wavelength infrared Si photodetector[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 43688.
- [69] Lin H, Luo Z, Gu T, et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: A perspective[J]. *Nanophotonics*, 2017, 7(2): 0085.
- [70] Youngblood N, Chen C, Koester S J, et al. Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 247-252.
- [71] Liu B, Kopf M, Abbas A N, et al. Black arsenic-phosphorus: Layered anisotropic infrared semiconductors with highly tunable compositions and properties[J]. *Adv Mater*, 2015, 27(30): 4423-4429.
- [72] Deckoff J S, Wang Y, Lin H, et al. Tellurene: A multifunctional material for midinfrared optoelectronics[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(7): 1632-1638.
- [73] Tong L, Huang X, Wang P, et al. Stable mid-infrared polarization imaging based on quasi-2 D tellurium at room temperature[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 2308.
- [74] Li T, Guo W, Ma L, et al. Epitaxial growth of wafer-scale molybdenum disulfide semiconductor single crystals on sapphire[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, 16(11): 1201-1207.
- [75] Huang Y, Tien E K, Gao S, et al. Electrical signal-to-noise ratio improvement in indirect detection of mid-IR signals by wavelength conversion in silicon-on-sapphire waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(18): 537.
- [76] Liu X, Kuyken B, Roelkens G, et al. Bridging the mid-infrared-to-telecom gap with silicon nanophotonic spectral translation[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 667-671.
- [77] Chen W, Roelli P, Hu H, et al. Continuous-wave frequency upconversion with a molecular optomechanical nanocavity [J]. *Science*, 2021, 374(6572): 1264-1267.