一种适用于近红外应用的氮化硅光子学高速波导集成InSe光电探测器

Srinvasa Reddy Tamalampudi[1], Juan Esteban Villegas[1,2], Ghada Dushaq[1], Raman Sankar[3], Bruna Paredes[1] 和 Mahmoud Rasras[1*]

[1] 纽约大学阿布扎比分校电气工程系，阿联酋阿布扎比萨迪亚特岛。[2] 纽约大学坦登工程学院电气工程系，美国纽约州布鲁克林都会科技中心6号，邮编11201。[3] 中央研究院物理研究所，中国台湾台北市南港区。S.R.T.和J.E.V.贡献相同。*通讯作者：mr5098@nyu.edu;

摘要

二维（2D）材料的片上集成，为在不同光子平台上实现新型光电子器件带来了巨大潜力。尤其是硒化铟（InSe），凭借超高载流子迁移率和出色的光响应度，成为极具前景的二维材料。本文报道了一种基于厚度为90纳米的多层InSe、集成于氮化硅（SiN）波导上的高速光电探测器。该器件在1伏偏压下的暗电流低至~10 纳安，光响应度高达0.38安培/瓦，在5伏偏压下测得的外量子效率高达 ~ 48.4%。该性能是在环境条件下、近红外（NIR）976纳米波长处测得的。此外，通过数值和实验研究，估算出单位长度吸收系数为0.11分贝/微米。为确定该光电探测器的动态响应，还评估了其小信号和大信号频率响应。测得其3分贝射频（RF）带宽为85兆赫，并在1吉比特·秒$^{-1}$ 数据传输条件下观察到清晰眼图。鉴于这些出色的光电子性能优势，基于集成多层InSe的有源光子器件可用于多种应用，包括短距离光互连、激光雷达成像和生物传感。

1. 引言

近红外（NIR 750 nm-1064 nm）集成光电探测器的开发，对于涵盖芯片实验室器件、环境传感到数据中心短距离通信等广泛的现代应用至关重要[1, 2]。此外，随着自动驾驶汽车技术的发展，激光雷达传感器通常采用 940-980 nm 波长，用于短至中距离的定位和制图[3, 4]。硅在这一带宽范围内的吸收特性，要求使用其他平台来构建集成光子器件。在这种情况下，可以采用氮化硅（SiN）构建光学电路，同时采用 Si、锗和 III-V族半导体制造光电探测器等有源光学元件 [5-7]。氮化硅波导与互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺完全兼容，具有低光传播损耗、高集成密度，以及从可见光到红外波段的宽带光学透明窗口[8, 9]。此外，即使在输入光功率较高时，它们也能实现线性传输[10]。采用标准半导体平台的 SiN 波导近红外光电探测器已有相关演示，而基于硅（Si）的光电探测器在 850-1000 nm 波长范围内的响应度高于 Ge/III-V器件[2]。然而，它们的带宽受到限制，因为

至较大的 RC 时间常数[11-13]。因此，亟需寻找能够集成到氮化硅平台上的新型有源光子材料，以实现近红外高速元件，包括光调制器和光电探测器。

过去十年间，基于石墨烯和其他几种二维材料的光电探测器，在可见光至近红外波长范围内展现出极高的响应度和量子效率[14-19]。这些材料本身通过较弱的范德华（VdW）力沿面外方向堆叠，并在面内方向以共价键结合。它们易于集成到各种平台中，从而简化制备工艺。因此，片上集成二维光探测器因相较于传统块体半导体光电探测器具有优势而备受关注[20,21]。尤其是，已有研究展示了在硅光子平台上带宽超过 100 GHz 的石墨烯光探测器[22]。然而，这些光电探测器大多针对电信波段进行了研究[20, 23, 24], ，而集成式近红外光电探测器尚未得到充分报道。

近年来，层状硒化铟（InSe）因其各向异性的光学、电学和力学性质，再度受到关注，被视为一种有源光学材料。研究人员已提出将其用于多种应用，包括存储器件、光学传感器、人工突触和神经网络计算[25, 26]。这种二维材料具有厚度依赖的可调带隙，属于 IIIA-VIA族层状半导体（MX，M = Ga 和 In，X = S、Se 和 Te）[27]。近期研究报道，基于原子级薄 InSe 薄片的场效应器件具有独特性质，例如在液氮温度和室温下，载流子迁移率分别达到 $10^4 cm^2 (Vs)^{-1}$ 和 $10^3 cm^2 (Vs)^{-1}$ [26, 28]。InSe 纳米片的载流子迁移率远高于过渡金属二硫属化物（TMDs），与黑磷的迁移率相近[29]。利用化学气相沉积（CVD）[30], 、原子层沉积（ALD）[31], 和脉冲激光沉积（PLD）[32] 等方法，已实现在各种衬底上大规模生长 InSe 薄膜，证明了大规模集成 InSe 器件的可行性。

基于少层硒化铟片的光电探测器在可见光至近红外波长范围内展现出宽带响应，并具有较高的光响应度[33]。此外，大量研究报道了不同类型的 InSe 探测器，包括基于光电导型（PC）、光电晶体管（PT）[33], 、自供能光探测器（SPPD）[34, 35], 和雪崩光探测器（APD）[36]的器件。然而，这些研究大多局限于可见光范围内垂直耦合的自由空间器件，因为 InSe 在该范围内具有最高的吸收系数。最近，Xiaoqi Cui 等人展示了一种片上集成 InSe 光电探测器，其工作波长为 520 nm，响应度为 0.115 安培/瓦，但该研究仅限于静态响应[37]。尽管其性能很有前景，但针对集成系统中近红外波段的 InSe 研究仍然鲜少，这促使人们深入研究这种材料在氮化硅平台上的应用。

在这项工作中，我们展示了工作于近红外区域的集成式 InSe 光电探测器，其集成于 SiN 平台上。混合式 SiN/InSe 波导光电探测器通过在 SiN 波导上机械剥离 InSe 薄片制成。器件在偏压下工作，且暗电流较低，仅为数纳安。此外，在 976纳米 波长下，器件实现了 0.38 安培·瓦$^{-1}$ 的出色光响应度，以及 4.7 纳瓦·赫$^{1/2}$ 的低噪声等效功率（NEP）。器件的 3 分贝射频（RF）带宽达到 85 兆赫，并针对 50 兆比特·秒$^{-1}$ 至 1 吉比特·秒$^{-1}$的开关键控调制信号展示了清晰眼图。所实现的优异性能为利用 InSe 在 SiN 平台上构建和设计有源光子器件开辟了新途径。

2. 结果与讨论

2.1 InSe集成到SiN光子学

图 1a 展示了制成的未加载SiN波导芯片的光学显微镜图像。该设计采用 400 纳米的顶部氮化硅层和 2 微米的埋氧层。波导采用空气包层，宽度为 1.1 微米。使用透镜光纤将光耦合进出 SiN 芯片。探测器的接触端采用预先图案化的 Cr/Au（10 纳米/120 纳米）金属电极制成。图 1b 分别示出了三维截面图和探测器的示意图。请注意，金属焊盘与 SiN 波导不在同一平面上，金属和波导顶面之间存在 270 纳米的高度差。

采用确定性干法转移工艺，将机械剥离的多层InSe转移至SiN波导上方，并直接覆盖在金属电极上方。值得注意的是，近期一项研究报告指出，InSe具有各向异性，其光吸收会受到晶体取向的显著影响。由于采用了我们的转移方法，制备的器件未能与使光吸收最大化的晶体取向完全对准[34]。关于确定性转移工艺的更多细节已在我们此前的工作中报道[23, 38]。制备器件的扫描电子显微镜（SEM）图像见图1(c)。金属电极对称地沉积在波导两侧，间隙固定为8 μm（金属边缘之间的距离），以尽量减少电极金属吸收造成的光学吸收损耗。在制备的器件中，探测器沿波导的重叠长度为~30 μm。使用原子力显微镜测得InSe厚度为~ 90nm（见图1d）。如图所示，薄片贴合在下方的光子波导结构上。

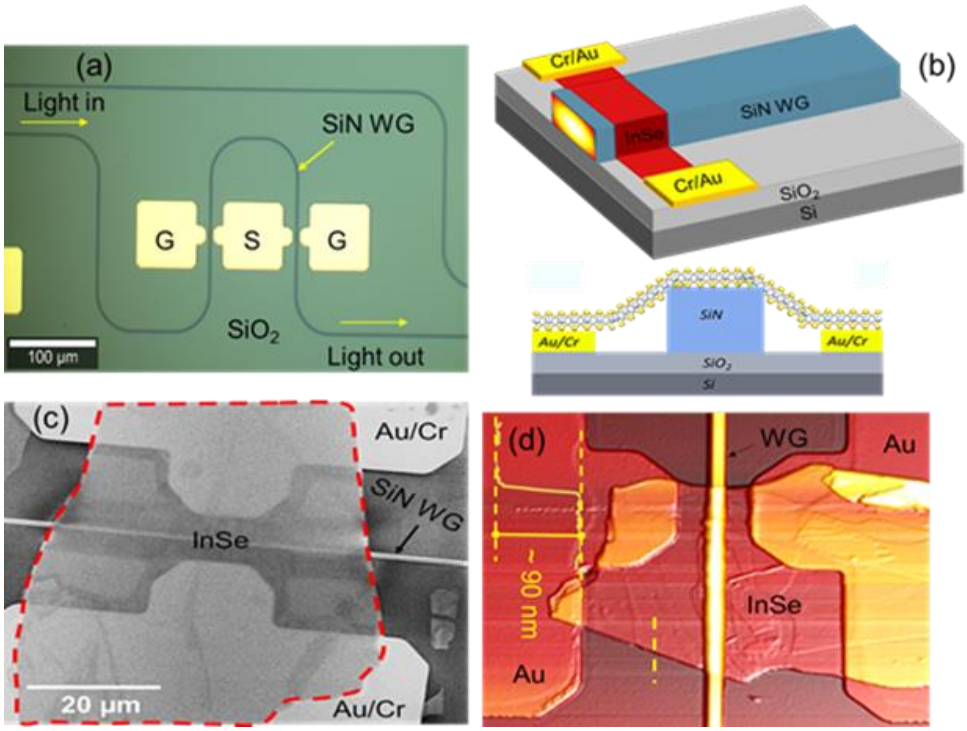

图1. InSe混合集成到SiN光子电路。(a) SiN未加载波导芯片的光学图像。(b) 异质InSe/SiN光电探测器的三维截面及示意图。(c) 转移到SiN波导上的InSe扫描电子显微镜图像。(f) 原子力显微镜图像扫描；黄色虚线表示厚度为~ 90 nm的InSe及~ 30 μm的相互作用长度。

2.2 多层 InSe 中的导引光相互作用

通过能量色散谱（EDS）、拉曼光谱、X射线衍射光谱（XRD）和椭偏测量，确认块体InSe及转移后InSe的材料特性。为确认其化学计量比，我们对生长的InSe单晶进行EDS分析，选取的区域由图2a扫描电子显微镜图像中粉色高亮方框标出。光谱仅显示铟（In）和硒（Se）元素的峰，原子比（In:Se）约为1:1。此外，图S1展示了集成于波导的InSe的扫描电子显微镜图像及元素组成，证实剥离和转移后其化学计量比仍受控为1:1（In:Se）。为确认晶体结构和材料相，我们对块体晶体进行了室温X射线衍射分析，结果见图2(b)。所有观测到的衍射峰均与此前报道的β-相InSe图谱吻合良好，证实了样品具有较高的纯度[33, 39]。图S2展示了β-相InSe晶体结构的示意图。此外，如补充图S3所示，集成于波导的InSe的拉曼光谱也确认了β-InSe相。所有观测到的活性声子模式均与其他关于β-相InSe的报道一致[40]。如图S4所示，对300 SiO_2/Si衬底上的InSe薄片进行高分辨率光谱椭偏测量，以确定其折射率（n）和消光系数（k）。这些数据用于光学模拟。

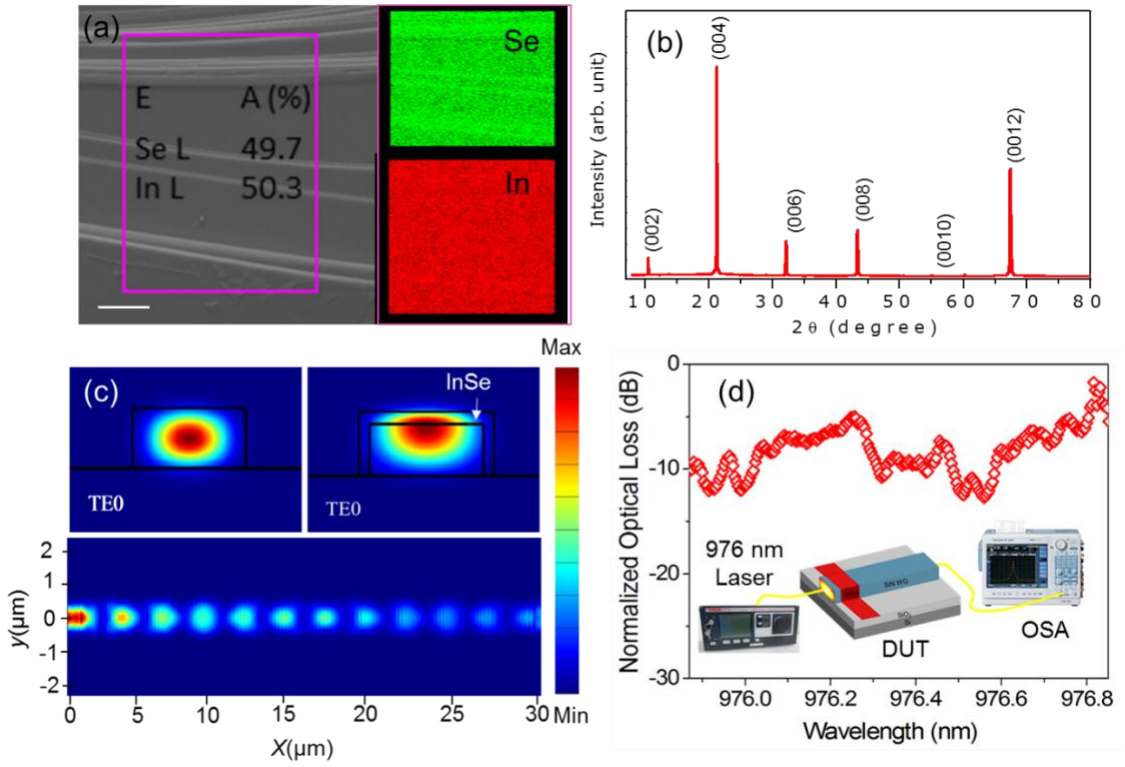

图 2. 厚度为 90 纳米、长度为 30 μm 的 InSe 层在 976纳米波长下的材料表征与导引光相互作用 (a) 多层 InSe 的扫描电子显微镜图像及其 EDS 元素分布图。比例尺为 50 μm。(b) 块体 β-InSe 的 X 射线衍射谱。(c) 在 976 纳米下，未加载 SiN 波导与 SiN 上 90 纳米 InSe 的横电模式电场分布（$|E|^2$）（上图）。光束传播的有限差分时域仿真（下图）。(d) 测得的 InSe 光传播损耗。插图为测量装置的示意图。

为研究该器件的光学特性，我们对混合 InSe/SiN 结构的有效折射率 (n_{eff})、模式限制和光吸收损耗 (κ) 进行了数值研究，所用 InSe 薄片厚度为 90 纳米。我们使用本征模求解器和时域有限差分法（FDTD）模拟模式和传播特性（见方法）。图 2(c)（上图）展示了未加载 SiN 波导及加载结构的基横电场模式（TE_0）的电场分布 ($|E|^2$)。补充表 S1 列出了波导参数的模拟信息。由于 InSe 薄片的折射率 (n= 3.1) 高于 SiN 波导的折射率 (n= 2.7)，光学模式更集中于 InSe 薄片中，从而使该层具有更高的光吸收。

如图 2c（下图）所示，我们使用 FDTD 模拟了混合结构中倏逝场在一定传播长度内的耦合。加载 SiN 波导的计算 TE_0 模式光传播损耗为 0.27 dB/μm。显然，相互作用长度为 30 μm、薄片厚度为 90 nm 时，几乎可以实现完全吸收，从而减小器件占用面积。此外，我们将激光耦合进入参考波导，并使用光谱分析仪（OSA）监测输出功率，以测量多层 InSe 集成前后的光损耗。图 2d 展示了引入的损耗，该损耗根据加载和未加载波导的测量透射率计算得出（插图为装置示意图）。这一结果对应的 InSe 厚度为 90 nm，相互作用长度为 ~ 93μm，波长为 976纳米。加载器件中由吸收导致的测量光损耗为 0.11 dB/μm，与模拟损耗处于同一范围。计算与测量所得传播损耗之间的差异，可能归因于 InSe 晶体取向变化及其对吸收的影响，正如前文所述。

2.3 静态电学与光学响应

在暗态和 976纳米单色激光激发下，测试了集成光电探测器的电流-电压特性。如第 2.2 节所述，InSe 与 SiN 之间的折射率差使有源InSe层内形成较强的光约束（见图 2c）。在这种情况下，InSe 通过直接带间跃迁吸收光子，这一点由测得的 InSe 光致发光得到证实（见图 S5）。此外，电子-空穴对的产生也会提高电导率。与此同时，光激发载流子在施加于两个平面内金属电极之间的横向电场作用下发生漂移。

图 3(a) 展示了光电探测器在暗态以及不同耦合光强下的 I–V 特性，光强范围为 0.21 μW 至 340 μW。如图中插图所示，器件在 1V 时的暗电流较低，为 ~ 10 nA；在 5 V 偏压下则增至约 ~ 94 nA（器件面积为 ~66.5 μm^2）。请注意，由于 InSe 具有各向异性输运行为，暗电流值也取决于晶体取向。Z. Guo 等人研究了这一效应，发现 InSe 两个正交取向之间存在角度依赖的暗电流，其比值为 3.76 (V_{ds} = 1V)[40]。在耦合光强为 0.21 μW 时，测得开路电压（V_{oc}）和短路电流（I_{sc}）分别为 0.19 V 和 63 pA。光强进一步增至 340 μW 时，V_{oc} 和 I_{sc} 分别达到 0.61 V 和 73 nA。

值得注意的是，Au（5.1 eV）与 InSe（4.6）之间的功函数差异会形成肖特基结[41, 42]。因此，制成的器件由背靠背的肖特基二极管组成。然而，显然该器件表现出不对称的输运行为。这表明两个 Au-InSe 结的肖特基势垒高度并不相同。这可能归因于界面处的缺陷和陷阱态

金属与半导体之间的界面难以控制，可能导致费米能级钉扎[43]。此外，非对称的接触几何结构（定义为 InSe薄片与两侧金属之间接触面积的差异）可能导致整流行为，尽管金属电极配置是对称的[44]。此前已有研究报道，在 InSe 和其他二维材料中，即使在零偏压下也会产生净光电流，从而实现自供电光电探测器[34, 35]。

图3b展示了不同功率下生成的光电流（$I_{ph} = I_{light}-I_{dark}$）随施加电压的变化。结果显示，光生电流较高，这可归因于InSe具有直接带隙特性，以及其与光学导模的相互作用长度较长。光电流与入射光功率的关系曲线（见图S6a）表明，在较低光功率下呈非线性行为，这可能主要归因于InSe[45]中存在长寿命陷阱。

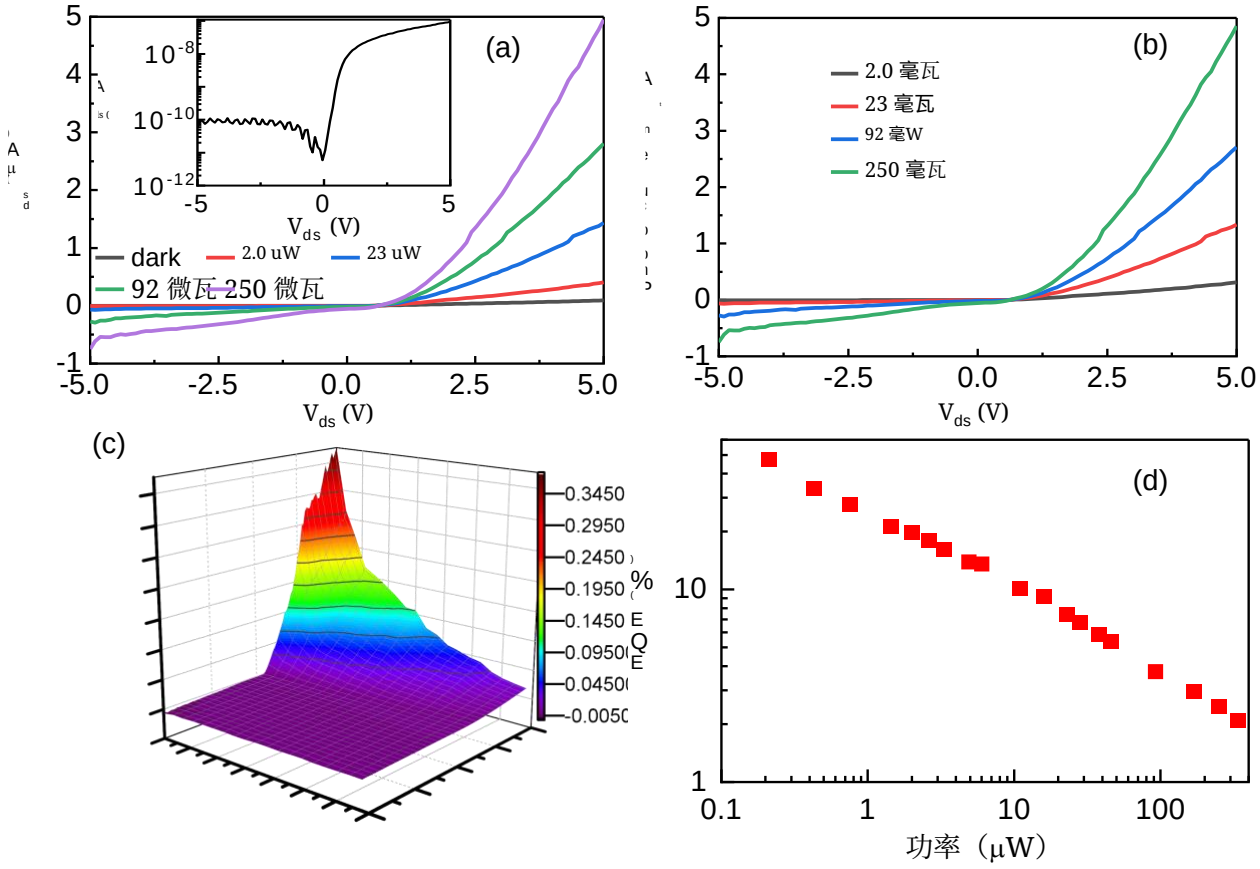

图3. InSe光电探测器的静态响应。（a）波导集成InSe光电探测器在暗态以及976纳米波长下不同功率时的I-V特性。插图显示了器件的暗电流。（b）不同耦合激光功率下产生的光电流。（c-d）不同功率下测得的光电流、响应度和外量子效率。

光电探测器的性能还通过测量其响应度（$R = I_{ph}/P$）进行评估。响应度是光电流（I_{ph}）与探测器接收到的光功率（P）之比。图3c展示了光电流和响应度随施加电压变化的三维图。在 5 V 时，测得光响应度为 0.38 AW^{-1}。这对应于 44% 的外量子效率（$EQE = 1.24 \times R/\lambda$）。根据所得结果，光电流随施加电压增大而增大；这与测辐射热效应不同，在测辐射热效应中，光电流的符号与施加偏压相反。此外，由于探测器具有

对称电极结构，因此可排除光热电效应（PTE）的影响。因此，我们的光电探测器性能主要由光电导效应主导。

此外，为评估该光电探测器的最小可探测功率（噪声等效功率，NEP），计算了其噪声等效功率。NEP 定义为 i_n/R，其中 i_n 是噪声电流，R 是响应度。因此，NEP 表示产生与噪声电流相等的光电流所需的激发功率。通常存在三种噪声源：$1/f$ 噪声、散粒噪声和约翰逊噪声，其中 f 表示频率。然而，对于高频信号 $f > 1$ kHz，总噪声电流由约翰逊噪声（$i_{nJ} = (4k_BT\Delta f)/R_0$，其中 是玻尔兹曼常数，T 是温度，$R_0$ 是沟道电阻）和散粒噪声（i_{ns} V 偏置电压下测得的约翰逊噪声、散粒噪 图 S6b）。

2.4 高速光响应

为测试光电探测器的动态性能，我们测量了其频率响应（RF）。采用商用光学高速调制器对 976纳米连续波激光进行调制。使用直流源通过偏置器为光电探测器施加偏压。随后将 RF 信号输入网络频谱分析仪（ESA）。实验装置示意图见补充图 S7。

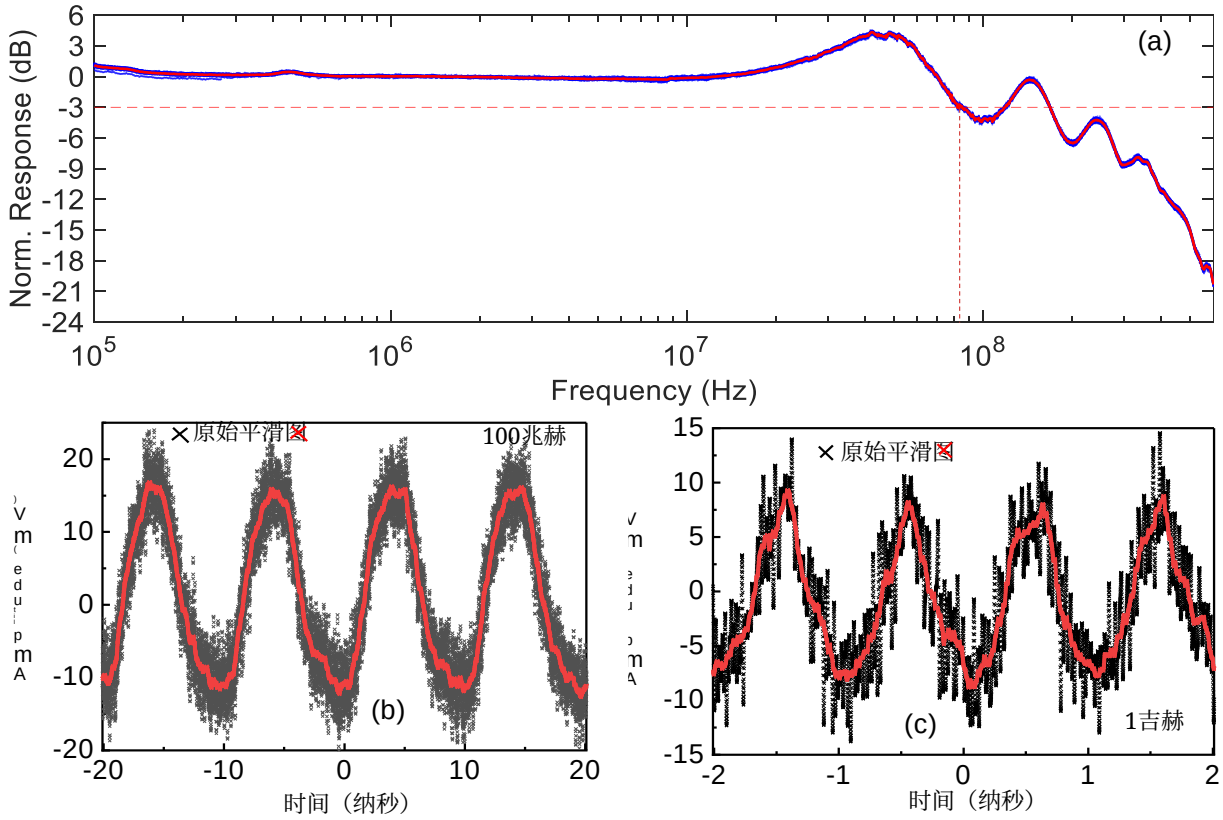

图4. InSe光电探测器的动态性能特性。(a) 10 V下的归一化频率响应。图中绘出了总计50次测量（蓝色散点）及其平均值（红线）。测得的3 dB截止频率为85兆赫。(b-c) 在时域记录的100兆赫和1 GHz调制光信号的时间响应；曲线采用200点移动平均法进行了平滑。

图4a展示了 InSe光电探测器的平均频率响应。该器件表现出稳定且可重复的响应，在 10 V 偏置电压下，3 dB截止频率为 85 兆赫。提取的上升时间 $\tau_{rise} \approx 0.35/f_{3dB}$ 约为 4.1 纳秒，其中 τ_{rise} 是瞬态响应从 10% 上升至 90% 所需的时间，对应的时间常数为 τ = 1.87 纳秒。据我们所知，这款基于 InSe 的光电探测器具有有记录以来最短的响应时间，比早期近红外波段研究中的响应时间短数个数量级，尤其比其他 InSe研究短 5 至 6 个数量级（见下文表1）。

材料	λ (nm)	响应度（安培/瓦）	Dark 电流 (nA)	响应 time	Ref.
掺杂InSe	980	7.87 * 10^3 在 1V 下	200	5 ms	48
石墨烯/砷化镓	980	0.059 在 0 V 下	100	24 毫秒	49
碲/锗	980	0.5 在 0 V 下	50	14 毫秒	50
p-n 型硒化铟	980	0.0005 在 0 V 下	0.0015	8.3 毫秒	51
InSe	980	0.00015 在 2 V 下		18 毫秒	51
InSe	976	0.38 在 5 伏特时	97	4.1 纳秒	This work

表1. InSe/SiN光电探测器与其他近红外光电探测器的性能比较

使用任意波形发生器和高速光调制器研究 InSe 器件的瞬态响应，并使用高速示波器监测输出信号形状。完整的实验装置见补充图 S8，电压相关的 f_{3dB} 见图 S9。使用调制正弦信号测得并平滑处理的响应（V_{ds} = 10 V）如图 4（b 和 c）所示。在 100兆赫和 1 GHz 下，瞬态响应的信噪比分别为 5.8 和 3.4。值得注意的是，在 1 GHz 下仍能清晰分辨信号。在 100兆赫和 1 GHz 下，瞬态响应的半高全宽（FWHM）分别为 4.3 纳秒和 0.41 纳秒。随后，进一步测试了该光电探测器对开关调制伪随机二进制序列（PRBS）的数据传输性能。图5显示了该光电探测器在 10 V 偏压下测得的眼图。对于 0.1 Gbit·s^{-1}的非归零（NRZ）数据速率，获得了清晰且开放的眼图。此外，在 0.5 的比特率下记录到开放眼图，在 1 Gbit.s^{-1}下则记录到部分开放眼图。图6[52-58]比较了 SiN/InSe 光电探测器与其他波导集成光电探测器的性能。值得注意的是，大多数集成光电探测器的报道集中在电信波段，而本研究的 f_{3dB} 低于基于石墨烯或黑磷（BP）的光电探测器。从电容——

电阻（RC）测量结果中，t测得的数值为 ~ 0.1 pF，和 0.1MΩ 在 1 兆赫z 频率下，分别对应的 RC限制带宽为 ~100 兆赫

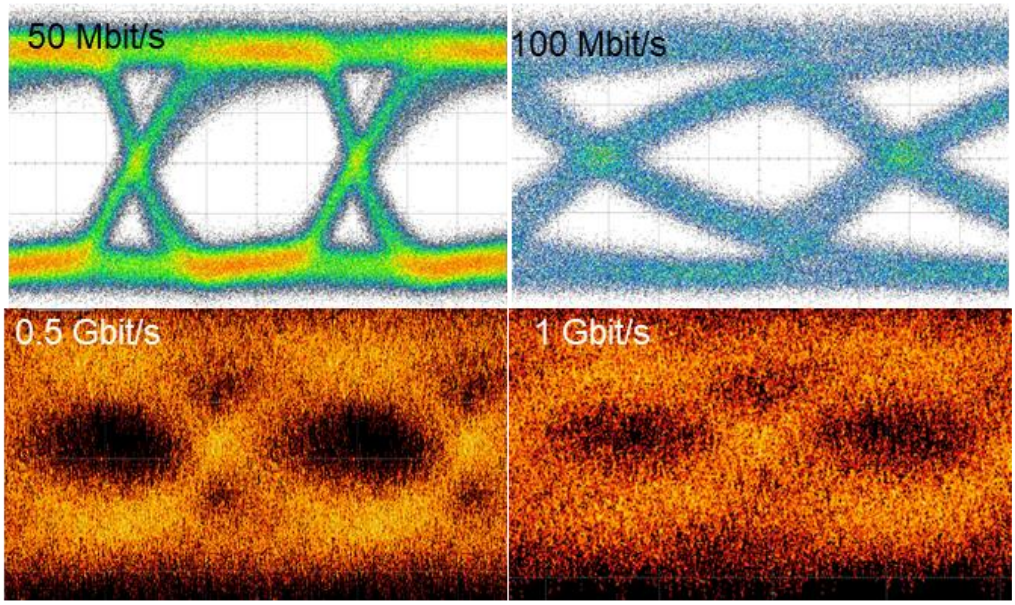

图5. 在10 V偏置电压下，以50兆比特每秒至1吉比特每秒的数据速率进行非归零调制时测得的眼图。

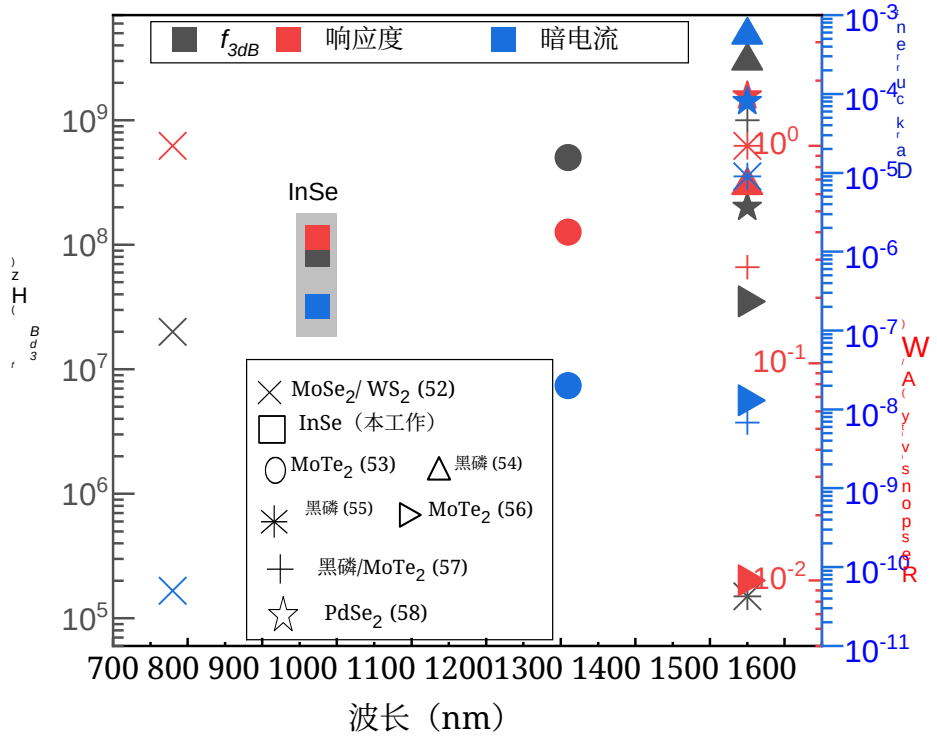

图6：集成光电探测器性能汇总 基于先前报道的二维材料的集成光电探测器，展示了其工作光谱响应、带 宽和响应度，以及本文展示的InSe光电探测器。

ir

显然，InSe器件的带宽仍有提升空间。可通过以下方法提升集成式InSe器件的性能：(i) 缩短InSe沟道长度，以进一步提高带宽。沟道长度为~ 10 μm的光电探测器需要具备~1000cm^2/V·s的迁移率，才能达到GHz范围带宽。(ii) 在本研究中，InSe薄片被转移到预先沉积的金属电极上，与埋入式器件相比，这会导致更高的接触电阻。(iii) InSe的暗电流与光电流之比具有偏振依赖各向异性，因此，在转移过程中控制InSe薄片的取向可提升器件性能。(iv) 与石墨烯形成异质结，或使用石墨烯作为电极。(v) 用六方氮化硼（hBN）封装InSe，可获得更高的载流子迁移率。请注意，在将InSe转移到SiN波导之前，并未进行钝化。众所周知，在集成之前转移hBN可钝化波导并降低其粗糙度。

3. 结论

总之，我们展示了一种工作于近红外（976纳米）波段的 InSe/SiN波导集成光电探测器。与其他集成光探测器相比，其制备工艺简单。制备的器件表现出 0.38 安培/瓦的外响应度（外量子效率为 ~ 44%）、在 1伏时仅 1 纳安的低暗电流，以及低至 4.7 纳瓦/赫兹$^{1/2}$ 的噪声等效功率。此外，InSe 相较于 SiN波导具有较高的折射率对比度（Δn）~ 0.4，从而提升了光吸收。测得厚度为 90 纳米的薄片吸收系数为 0.11 分贝/微米。此外，该器件在 10伏时的 3 分贝截止频率达到 85 兆赫，并在 0.5 至 1 Gbit.s^{-1} 的比特率下呈现清晰的眼图。这种基于 InSe 的光电探测器具有高带宽，性能比已报道的类似器件高出五至六个数量级以上。我们认为，通过提高载流子迁移率、改善波导与 InSe 的界面并降低电路电容，可进一步提升带宽。本研究展示了采用简单架构实现高性能光电探测器的可行性，其应用潜力广泛，包括芯片实验室器件、激光雷达系统成像以及数据中心的短距离互连。

4. 方法

4.1 材料与制备

晶体生长

InSe单晶由纯度为99.999%的In（重量百分比为52.4%）和Se（47.6%）化合物按比例混合制成，这些化合物购自Sigma-Aldrich。使用抽至10^{-4} Pa的锥形石英安瓿制备InSe单晶薄片。使用水平炉在550°C下均匀化批料并制备InSe薄片，持续48小时。采用布里奇曼垂直法生长混合晶体。装有熔体的安瓿在850°C下加热24小时后开始拉制；待熔体充满安瓿尖端后，以0.1mm/h的速度将安瓿沿1°C的温度梯度向下移动。所得InSe晶体的尺寸为3 cm × 1.2 cm。

Si_3N_4 平台

无源氮化硅光子器件采用 Applied nano tools inc. 的标准 220纳米绝缘体上硅工艺制造。器件中的金属焊盘通过电子束光刻图案化，随后进行金属沉积

焊盘（Ti/Au，10/100 nm）通过电子束蒸发和标准剥离工艺制备。沉积金属焊盘后，借助 PDMS 薄膜转移 InSe。

InSe转移

使用透明胶带剥离少数层InSe薄片，并将其转移到PDMS基底上。通过可控干法转移，将选定的InSe薄片转移到SiN波导上。

4.2 仿真

使用Lumerical中的MODE Solutions本征模求解器和有限差分时域仿真，计算氮化硅波导中的电场分布和光束传播。InSe所采用的光学参数取自椭偏测量结果。

4.3 材料表征

光谱成像椭偏仪

多层InSe的光学参数由Accurion的成像椭偏仪（https://accurion.com/company）测定。该系统将光学显微镜与椭偏测量相结合，可对层厚和折射率进行空间分辨测量。该仪器对超薄单层和多层薄膜具有极高的灵敏度，测量范围从单原子层或单分子层（亚纳米范围）到数微米厚的薄膜。此外，成像椭偏仪可实现空间分辨率低至 1 μm 的层厚测量。使用 EP4 模型软件拟合椭偏参数 Psi (ψ) 和 Delta (Δ)。

扫描电子显微镜

使用一台电子能量为 10 KV 的（FEI）Quanta 450 场发射扫描电子显微镜对光子芯片进行成像，成像时芯片通过碳胶带固定在 SEM 样品台上。

原子力显微镜

使用 WITec 原子力显微镜（AFM）模块的轻敲模式测定转移后的 InSe薄片厚度。悬臂探针（Scanasyst-air）的半径为 7 nm，力常数为 0.2 N/m，共振频率为 14 kHz。

4.4 器件表征

光学表征

通过边缘耦合，利用透镜光纤将光耦合至光子芯片，并使用工作波长为 976纳米的可调谐激光器进行光学传输测量。器件的输出响应由输出透镜光纤收集，并由功率计检测。测试器件前，使用标准光电二极管功率传感器对输出光功率强度进行校准。

直流测量

通过测量InSe光电探测器的暗电流和响应度，测试其稳态性能。波长为976纳米、横向电场偏振（TE）的光通过透镜光纤边缘耦合至器件。使用曲线示踪仪/功率器件分析仪/（Agilent B1505A）控制偏压，并通过一对标准直流电探针测量暗态下以及耦合光照时的I-V特性。

致谢

纽约大学阿布扎比分校研究提升基金支持了这项工作。部分研究工作在纽约大学阿布扎比分校的核心技术平台（CTP）完成。作者感谢CTP工作人员提供的技术和仪器支持，尤其感谢Nikolas Giakoumidis先生、James Weston博士和Qiang Zhang博士在光学、分析和微纳加工方面提供的支持。RS感谢台湾科技部通过项目编号NSC-111-2124-M-001-009和AS- iMATE-111-12提供的经费支持。

贡献

S.R.T. 发起了该研究并制定了实验计划。S.R.T. 制备了器件，并测量了其电学性能和光电探测器性能。J.E.V. 和 S.R.T. 完成了射频和带宽测量，并分析了数据。S.R. T. 对 InSe晶体和集成器件进行了材料表征（EDS、拉曼、XRD 和椭偏仪表征）。J.E.V. 完成了有限差分时域仿真。J.E.V. 和 G.D 完成了扫描电子显微镜和原子力显微镜表征。R. S. 完成了 InSe晶体的生长。B.P.、G.D. 和 J.E.V. 设计了 SiN 光子芯片。所有作者均分析并讨论了数据。S.R.T.、J.E.V.、G.D. 和 M. R. 撰写了论文。S.R.T. 和 J.E.V. 的贡献相同。M.R 负责监督该项目。

利益冲突声明

作者声明不存在任何利益冲突。

数据可用性

本文所呈现结果的基础数据目前尚未公开，但可根据合理请求向作者获取。

补充文档 补充图 S1
–S9，表 S1。

参考文献

1. Alberti, S.; Datta, A.; Jágerská, J.，《用于红外和拉曼气体光谱学的基于集成纳米光子波导的器件》。*Sensors 21*（21）。2. Chatterjee, A.; Saumitra; Sikdar, S. K.; Selvaraja, S. K.，《面向短距离数据通信的SiN-SOI平台高速波导集成硅光电探测器》。*Opt. Lett. 44*（7），1682-1685。3. Lee, H. J.; Jung, K. Y.; Kim, Y.-S.，《具有增强近红外反射率、用于激光雷达探测冷颜料的纳米结构Fe2O3/TiO2复合颗粒》。*RSC Advances* **2021年，** *11*（28），16834-16840。4. Jha, A.，《用于遥感和激光雷达的稀土掺杂玻璃波导中可见光、近红外和中红外跃迁综述》。SPIE：2006年；第6409卷。5. Ciftcioglu, B.; Zhang, J.; Sobolewski, R.; Wu, H.，《具有13 GHz带宽和8-μ安培暗电流的850 nm垂直入射锗金属–半导体–金属光电探测器》。*IEEE Photonics Technology Letters 22*（24），1850-1852。6. Hsu, B. C.; Chang, S. T.; Chen, T. C.; Kuo, P. S.; Chen, P. S.; Pei, Z.; Liu, C. W.，《高效率820 nm MOS锗量子点光电探测器》。*IEEE Electron Device Letters 24*（5），318-320。

7. Chen, G.; Goyvaerts, J.; Kumari, S.; Kerrebrouck, J. V.; Muneeb, M.; Uvin, S.; Yu, Y.; Roelkens, G.，《通过转移印刷实现用于850 nm波长光子插接器的高速砷化镓金属-半导体-金属光电探测器集成》。Opt. Express 26（5），6351-6359。8. Sacher, W. D.; Luo, X.; Yang, Y.; Chen, F.-D.; Lordello, T.; Mak, J. C. C.; Liu, X.; Hu, T.; Xue, T.; Guo-Qiang Lo, P.; Roukes, M. L.; Poon, J. K. S.，《减薄200 mm硅晶圆上的可见光氮化硅波导器件和可植入神经光子探针》。Opt. Express 2019年，27（26），37400-37418。9. Romero-García, S.; Merget, F.; Zhong, F.; Finkelstein, H.; Witzens, J.，《用于可见光波长集成光子学应用的氮化硅兼容CMOS的平台》。Opt. Express 2013，21（12），14036-14046。10. Zabelich, B.; Nitiss, E.; Stroganov, A.; Brès, C.-S.，《通过电场极化实现氮化硅波导中的线性电光效应》。ACS Photonics 2022年，9（10），3374-3383。11. Xiang, H. J.; Huang, B.; Kan, E.; Wei, S.-H.; Gong, X. G.，《通过逆向能带结构设计方法实现直接带隙硅相》。Physical review letters 110（11），118702。12. Li, G.; Maekita, K.; Mitsuno, H.; Maruyama, T.; Iiyama, K.，《通过兼容CMOS的工艺在绝缘体上硅衬底上制造的带宽超过10 GHz的横向硅光电探测器》。Japanese Journal of Applied Physics 54（4S），04DG06。13. Gao, Y.; Cansizoglu, H.; Polat, K. G.; Ghandiparsi, S.; Kaya, A.; Mamtaz, H. H.; Mayet, A. S.; Wang, Y.; Zhang, X.; Yamada, T.; others，《光子捕获微结构实现高速高效率硅光电二极管》。Nature Photonics 11（5），301-308。14. Wang, G.; Zhang, Y.; You, C.; Liu, B.; Yang, Y.; Li, H.; Cui, A.; Liu, D.; Yan, H.，《基于二维材料的光电探测器》。Infrared Physics & Technology 88，149-173。15. Huang, M.; Wang, M.; Chen, C.; Ma, Z.; Li, X.; Han, J.; Wu, Y.，《具有高响应度的宽带黑磷光电探测器》。Advanced Materials 2016年，28（18），3481-3485。16. Yao, J.; Yang, G.，《二维材料宽带光电探测器》。Nanoscale 2020年，12（2），454-476。17. Wang, B.; Zhong, S. P.; Zhang, Z. B.; Zheng, Z. Q.; Zhang, Y. P.; Zhang, H.，《基于二维IVA族金属硫属化物半导体的宽带光电探测器》。Applied Materials Today 2019年，15，115-138。18. Li, A.; Chen, Q.; Wang, P.; Gan, Y.; Qi, T.; Wang, P.; Tang, F.; Wu, J. Z.; Chen, R.; Zhang, L.; Gong, Y.，《基于介电屏蔽MoTe2/石墨烯/SnS2 p–g–n结的超高灵敏度宽带光电探测器》。Advanced Materials 2019年，31（6），1805656。19. Tamalampudi, S. R.; Rasras, M. S.，《基于少层GaGeTe的高性能宽带光电探测器（UV-NIR）》，2021年激光与光电会议（CLEO），2021年5月9-14日；2021年；第1-3页。20. You, J.; Luo, Y.; Yang, J.; Zhang, J.; Yin, K.; Wei, K.; Zheng, X.; Jiang, T.，《基于二维材料的混合集成硅光子学：光通信纳米系统》。Laser & Photonics Reviews 14（12），2000239。21. Cheng, Z.; Cao, R.; Wei, K.; Yao, Y.; Liu, X.; Kang, J.; Dong, J.; Shi, Z.; Zhang, H.; Zhang, X.，《二维材料赋能的下一代集成光电子学：从制备到应用》。Advanced Science 8（11），2003834。22. Salamin, Y.; Ma, P.; Baeuerle, B.; Emboras, A.; Fedoryshyn, Y.; Heni, W.; Cheng, B.; Josten, A.; Leuthold, J.，《100 GHz等离激元光电探测器》。ACS photonics 5（8），3291-3297。23. Dushaq, G.; Paredes, B.; Villegas, J. E.; Tamalampudi, S. R.; Rasras, M.，《用于有源硅光子器件的二维范德华锗磷（GeP）片上集成》。Opt. Express 2022年，30（10），15986-15997。24. Tamalampudi, S. R.; Dushaq, G.; Villegas, J. E.; Paredes, B.; Rasras, M. S.，《面向电信波段光电子集成的Si2Te3光电探测器》。IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 2022年，28（3：硅光子学混合集成），1-7。25. Bandurin, D. A.; Tyurnina, A. V.; Yu, G. L.; Mishchenko, A.; Zólyomi, V.; Morozov, S. V.; Kumar, R. K.; Gorbachev, R. V.; Kudrynskyi, Z. R.; Pezzini, S.; others，《原子级薄InSe中的高电子迁移率、量子霍尔效应和反常光学响应》。Nature nanotechnology 12（3），223-227。26. Mohta, N.; Rao, A.; Remesh, N.; Muralidharan, R.; Nath, D. N.，《使用α- In2Se3范德华铁电通道实现模式识别的人工突触晶体管》。RSC Adv. 11（58），36901-36912。

27. Sang, D. K.; Wang, H.; Qiu, M.; Cao, R.; Guo, Z.; Zhao, J.; Li, Y.; Xiao, Q.; Fan, D.; Zhang, H.，具有层依赖性质的二维β-InSe：能带排列、功函数和光学性质。《纳米材料》2019年，9 (1)，82。28. Sucharitakul, S.; Goble, N. J.; Kumar, U. R.; Sankar, R.; Bogorad, Z. A.; Chou, F.-C.; Chen, Y.-T.; Gao, X. P. A.，多层 InSe 场效应晶体管中的本征电子迁移率超过 103 cm2/(V s)。Nano Letters 15 (6)，3815-3819。29. Rudenko, A. N.; Brener, S.; Katsnelson, M. I.，单层黑磷中的本征载流子迁移率。Phys. Rev. Lett. 116 (24)，246401。30. Chang, H.-C.; Tu, C.-L.; Lin, K.-I.; Pu, J.; Takenobu, T.; Hsiao, C.-N.; Chen, C.-H.，通过化学气相沉积合成大面积 InSe 单层。《 Small 》 2018 年，14 (39)，1802351。31. Browning, R.; Kuperman, N.; Moon, B.; Solanki, R.，InSe 和 Sb2Se3 层状半导体及其异质结构的原子层生长。《电子学》2017年，6 (2)，27。32. Yang, Z.; Jie, W.; Mak, C.-H.; Lin, S.; Lin, H.; Yang, X.; Yan, F.; Lau, S. P.; Hao, J.，晶圆级合成具有宽带光响应的高质量半导体二维层状 InSe。《ACS纳米》2017年，11 (4)，4225-4236。33. Tamalampudi, S. R.; Lu, Y.-Y.; U, R. K.; Sankar, R.; Liao, C.-D.; B, K. M.; Cheng, C.-H.; Chou, F. C.; Chen, Y- T.，具有宽光谱响应的高性能可弯曲少层 InSe 光电探测器。Nano Letters 2014，14 (5)，2800-2806。34. Chen, J.; Zhang, Z.; Feng, J.; Xie, X.; Jian, A.; Li, Y.; Guo, H.; Zhu, Y.; Li, Z.; Dong, J.; Cui, Q.; Shi, Z.; Xu, C.，采用相同金属非对称接触的二维 InSe 自供电肖特基光探测器。《先进材料界面》2022年，9 (35)，2200075。35. Dai, M.; Chen, H.; Feng, R.; Feng, W.; Hu, Y.; Yang, H.; Liu, G.; Chen, X.; Zhang, J.; Xu, C.-Y.; Hu, P.，由表面等离激元共振和非对称肖特基结诱导的高性能双波段多层 InSe 自供电光电探测器。《ACS纳米》2018年，12 (8)，8739-8747。36. Lei, S.; Wen, F.; Ge, L.; Najmaei, S.; George, A.; Gong, Y.; Gao, W.; Jin, Z.; Li, B.; Lou, J.; Kono, J.; Vajtai, R.; Ajayan, P.; Halas, N. J.，原子层状 InSe 雪崩光探测器。Nano Letters 2015，15 (5)，3048-3055。37. Cui, X.; Du, M.; Das, S.; Yoon, H. H.; Pelgrin, V. Y.; Li, D.; Sun, Z.，基于范德华材料介电平台的片上光子学与光电子学。Nanoscale 14 (26)，9459-9465。38. Tamalampudi, S.; Dushaq, G.; Villegas, J.; Paredes, B.; Rasras, M.，集成于硅光子学中的多层 GaGeTe 电光器件。《光波技术期刊》 2023 年，PP。39. Wang, J.-J.; Cao, F.-F.; Jiang, L.; Guo, Y.-G.; Hu, W.-P.; Wan, L.-J.，单根 InSe 单晶纳米线的高性能光电探测器。《美国化学会志》2009年，131 (43)，15602-15603。40. Guo, Z.; Cao, R.; Wang, H.; Zhang, X.; Meng, F.; Chen, X.; Gao, S.; Sang, D. K.; Nguyen, T. H.; Duong, A. T.; Zhao, J.; Zeng, Y.-J.; Cho, S.; Zhao, B.; Tan, P.-H.; Zhang, H.; Fan, D.，二维β-InSe 上的高性能偏振敏感光电探测器。《国家科学评论》2021年，9 (5)。41. Lang, O.; Pettenkofer, C.; Sánchez Royo, J. F.; Segura, A.; Klein, A.; Jaegermann, W.，层状半导体 InSe 上 In2O3 薄膜的生长与能带排列。LANG, O.；PETTENKIFER, C.；SÁNCHEZ ROYO, J.F.；SEGURA, A.；KLEIN, A.；JAEGERMANN, W. 层状半导体 InSe 上 In2O3 薄膜的生长与能带排列。载于：《应用物理学杂志》，1999年，第86卷，第10期，1999年，86。42. Zhao, Q.; Jie, W.; Wang, T.; Castellanos-Gomez, A.; Frisenda, R.，基于范德华接触的 InSe 肖特基二极管。Advanced Functional Materials 2020年，30 (24)，2001307。43. Liu, X.; Choi, M. S.; Hwang, E.; Yoo, W. J.; Sun, J.，费米能级钉扎依赖型二维半导体器件：挑战与展望。Advanced Materials 2022年，34 (15)，2108425。44. Abnavi, A.; Ahmadi, R.; Ghanbari, H.; Fawzy, M.; Hasani, A.; De Silva, T.; Askar, A. M.; Mohammadzadeh, M. R.; Kabir, F.; Whitwick, M.; Beaudoin, M.; O'Leary, S. K.; Adachi, M. M.，基于具有几何非对称接触面积的二维 MoS2 二极管的柔性高性能光伏器件。Advanced Functional Materials 2023年，33 (7)，2210619。

45. Zhao, Q.; Wang, W.; Carrascoso-Plana, F.; Jie, W.; Wang, T.; Castellanos-Gomez, A.; Frisenda, R.，陷阱在 InSe 薄层光电探测器光电流产生机制中的作用。Materials Horizons 2020年，7 (1)，252-262。46. Liu, C.; Guo, J.; Yu, L.; Li, J.; Zhang, M.; Li, H.; Shi, Y.; Dai, D.，硅/二维材料光电探测器：从近红外到中红外。Light: Science & Applications 2021年，10 (1)，123。47. Huang, L.; Tan, W. C.; Wang, L.; Dong, B.; Lee, C.; Ang, K.-W.，具有可调响应度和低噪声等效功率的红外黑磷光电晶体管。ACS Applied Materials & Interfaces 2017年，9 (41)，36130-36136。48. Jang, H.; Seok, Y.; Choi, Y.; Cho, S.-H.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Lee, K.，基于表面掺杂 InSe 的高性能近红外光电探测器。Advanced Functional Materials 2021年，31 (3)，2006788。49. Wu, J.; Yang, Z.; Qiu, C.; Zhang, Y.; Wu, Z.; Yang, J.; Lu, Y.; Li, J.; Yang, D.; Hao, R.; Li, E.; Yu, G.; Lin, S.，利用上转换纳米粒子提升石墨烯/GaAs 自驱动近红外光电探测器的性能。Nanoscale 2018年，10 (17)，8023-8030。50. Zheng, B.; Wu, Z.; Guo, F.; Ding, R.; Mao, J.; Xie, M.; Lau, S. P.; Hao, J.，通过分子束外延生长大面积碲/锗异质结，实现高性能自供电光电探测器。Advanced Optical Materials 2021年，9 (20)，2101052。51. Patil, C.; Dong, C.; Wang, H.; Nouri, B. M.; Krylyuk, S.; Zhang, H.; Davydov, A. V.; Dalir, H.; Sorger, V. J.，自驱动高响应度 p-n 结 InSe 异质结构近红外光探测器。Photonics Research 2022年，10 (7)，A97-A105。52. Gherabli, R.; Indukuri, S. R. K. C.; Zektzer, R.; Frydendahl, C.; Levy, U.，与氮化硅波导集成的 MoSe2/WS2 异质结光电二极管，用于高响应度近红外光探测。Light: Science & Applications 2023年，12 (1)，60。53. Ma, P.; Flöry, N.; Salamin, Y.; Baeuerle, B.; Emboras, A.; Josten, A.; Taniguchi, T.; Watanabe, K.; Novotny, L.; Leuthold, J.，在电信波段具有高灵敏度的快速 MoTe2 波导光电探测器。ACS Photonics 2018年，5 (5)，1846-1852。54. Youngblood, N.; Chen, C.; Koester, S. J.; Li, M.，具有高响应度和低暗电流的波导集成黑磷光电探测器。Nature Photonics 2015年，9 (4)，247-252。55. Chen, C.; Youngblood, N.; Peng, R.; Yoo, D.; Mohr, D. A.; Johnson, T. W.; Oh, S.-H.; Li, M.，黑磷光电探测器与硅光子学和纳米等离激元学的三维集成。Nano Letters 2017年，17 (2)，985-991。56. Maiti, R.; Patil, C.; Saadi, M. A. S. R.; Xie, T.; Azadani, J. G.; Uluutku, B.; Amin, R.; Briggs, A. F.; Miscuglio, M.; Van Thourhout, D.; Solares, S. D.; Low, T.; Agarwal, R.; Bank, S. R.; Sorger, V. J.，用于硅光子集成电路的应变工程高响应度 MoTe2 光电探测器。Nature Photonics 2020年，14 (9)，578-584。57. Tian, R.; Gan, X.; Li, C.; Chen, X.; Hu, S.; Gu, L.; Van Thourhout, D.; Castellanos-Gomez, A.; Sun, Z.; Zhao, J.，具有低暗电流和高响应度的芯片集成范德华 PN 异质结光电探测器。Light: Science & Applications 2022年，11 (1)，101。58. Wu, J.; Ma, H.; Zhong, C.; Wei, M.; Sun, C.; Ye, Y.; Xu, Y.; Tang, B.; Luo, Y.; Sun, B.; Jian, J.; Dai, H.; Lin, H.; Li, L.，宽红外波长范围内的波导集成 PdSe2 光电探测器。Nano Letters 2022年，22 (16)，6816-6824。