

专题: 二维材料与未来信息器件

基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪*

王晗 陈晓龙†

(南方科技大学电子与电气工程系, 深圳 518055)

(2025年11月24日收到; 2025年12月31日收到修改稿)

光谱仪是可以同时获得入射光强度和波长等多维度信息的设备, 在实验室和工业界均具有重要的应用价值. 然而, 基于光栅或迈克耳孙干涉仪的传统光谱仪体积庞大, 这限制了光谱仪在便携设备上的集成与应用. 因此, 光谱仪的微型化、片上化对新一代光电子器件的发展至关重要. 二维材料因其具有丰富的能带调控方式的特点, 在实现片上微型光谱仪方面具有巨大潜力. 本综述将介绍基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪, 剖析其工作原理、技术优势及局限性. 分类介绍基于斯塔克效应、隧穿效应、电致伸缩效应等代表性的极少电极单元器件微型光谱仪的工作原理, 对比其性能与特点. 进一步深入探讨面临的挑战, 如材料制备、器件集成与兼容性、光谱重构算法优化等, 并对未来微型光谱仪的发展做出展望. 本文旨在为微型光谱仪领域的研究提供有益参考, 推动极少电极单元器件微型光谱仪的进一步发展与应用.

关键词: 二维材料, 微型光谱仪, 光电探测, 电场调控**DOI:** 10.7498/aps.75.20251596**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251596

1 引言

1.1 研究背景与意义

光谱仪作为获得物质光谱信息的核心设备, 在众多领域发挥着重要作用, 例如分析材料的成分与结构、监测化学反应的进行过程、排查大气和水体中的污染物等^[1-3]. 与仅可探测入射光强度的单一探测器相比, 光谱仪可以同时获得入射光的强度和波长两个维度的信息, 通过提取分析光谱特征, 可以准确识别物体的种类、成分等. 例如, 在食品检测中, 光谱仪可以通过不同物质的光谱吸收特性, 判断食物中是否含有非法添加成分; 在刑事侦查中, 光谱仪可以用于毒品检测; 在医药领域, 光谱仪可以用来进行成分鉴定等. 然而, 传统光谱仪体积庞大、成本高昂, 难以走出实验室用于便携设备中. 微纳加工技术的兴起推动了光谱仪的微型化进

程, 出现了基于微机电系统、集成光子器件等多种微型光谱仪. 然而, 其进一步迈向大规模、低成本、可嵌入的片上集成系统时, 遭遇了根本性瓶颈: 光谱分辨率的提升不可避免地伴随着仪器尺寸和结构复杂度的增加. 具体而言, 依据经典色散或滤波原理, 高分辨率必然要求更多的物理探测单元和更复杂的光学结构, 这直接导致芯片面积、读出电路复杂度和制造成本的急剧上升.

如何在有限的尺寸与测量单元下获取丰富的光谱信息, 成为下一代微型光谱仪发展的核心科学问题. 近年来, 极少电极重构型微型光谱仪, 作为一种突破性的技术应运而生. 其彻底摒弃了“一个波长对应一个探测器”的传统并行架构, 转而采用“编码测量-计算重构”的新范式. 该范式通过极少数乃至单个可动态调控的光电探测单元, 获取一系列混合编码的光电流信号, 再利用先进的算法从这些压缩的测量值中数学重构出完整光谱. 这一变革, 将硬件复杂度从空间维度转移到了信息维度,

* 深圳市优秀科技创新人才培养项目优秀青年基础研究项目 (批准号: RCYX20221008092900001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenxl@sustech.edu.cn

为实现原子尺度传感与片上智能系统的融合提供了前所未有的可能^[1-5].

尽管已有研究关注于微型光谱仪或计算光谱学,但尚无综述系统性地聚焦于“极少电极”这一颠覆性硬件特征,并深入探讨其背后的信息论基础、实现路径、核心挑战.本文旨在填补这一空白.本综述将揭示极少电极架构的信息瓶颈本质及其突破原理,分类介绍基于斯塔克效应、隧穿效应、电致伸缩效应等代表性的极少电极单元器件微型光谱仪,对比其性能与特点.进一步深入探讨面临的挑战,如材料制备、器件集成与兼容性、光谱重构算法优化等,并对未来微型光谱仪的发展做出展望.本综述旨在为研究人员提供关于“极少电极”光谱仪技术的清晰参考,并指出这项技术的“革命性”成功,需要高性能可调谐材料、稳健的重构算法、精巧的调控手段等方面共同配合,需要软件和硬件的协同发展.

1.2 光谱仪基本原理

光谱仪的基本原理是利用不同波长光的干涉、衍射、透射等特性,将未知光谱的入射光按波长进行分离,并测量得到不同波长光的强度,从而获得光谱信息.传统光谱仪按工作原理可以分为分光型、干涉型和滤光片型等.其中,分光型光谱仪是通过棱镜或光栅等元件将未知光谱的入射光按波长在空间上分解,再通过光电探测器阵列检测不同波长光的强度,最终得到整个入射光的光谱图.分光型光谱仪结构直观、技术成熟、分辨率高,但所需的光栅往往体积较大并需要一定的空间距离分光,不适合片上集成.干涉型光谱仪,以傅里叶变换光谱仪为代表,其工作原理是基于迈克尔孙干涉仪产生光的干涉信号,测量干涉仪不同动镜位置下的光强信号(干涉信号),然后通过傅里叶变换将干涉信号转化为强度-波长信号,即入射光的光谱.干涉型光谱仪利用了入射光全波段的信息,能量利用率高,但需要高精度空间光学结构,往往体积庞大,成本高昂.滤光片型光谱仪利用窄带滤光片直接筛选出特定波长的光,通过探测器检测该波长的强度.滤光片型光谱仪结构简单,但光谱分辨率和工作范围依赖滤光片的带宽和数量,若要实现高分辨率宽谱检测,需要数量庞大且极窄带宽的滤波片.

随着科技的飞速发展,低成本、便携式的微型光谱仪的需求日益增长,尤其是可以片上集成的微

型光谱仪.例如在智能驾驶领域,光谱仪能够同时捕捉物体的强度和波长信息,面对不同的光照和天气情况,具有比传统单一探测器更强的抗干扰能力,对各种路况和物体进行快速识别和判断;在医疗领域,微型光谱仪可应用于可穿戴设备上,分析血糖、血氧等生理指标,监测人体健康状况;在航天与遥感领域,同样也需要轻量化的光谱成像设备,以降低发射成本.然而传统光谱仪需要光栅或干涉仪等体积庞大的元件,难以在上述对空间要求较高的场景中使用^[1-5].

1.3 微型光谱仪简介

微型光谱仪体积可压缩至毫米级,可以嵌入智能手环、手机等穿戴设备,或应用于手持式光谱仪等便携设备中,具有体积小、响应快、可批量生产、成本低等优点.从工作原理上分类,微型光谱仪有分光型、干涉仪型、滤波片型以及计算重构型等类型^[1-5].分光型、干涉仪型、滤波片型微型光谱仪的工作原理与传统光谱仪并无区别,只是通过微纳加工技术,将光栅、棱镜、干涉仪、滤波片微型化,实现尺寸的缩小^[3,6-9].计算重构型微型光谱仪则不同于传统的“分光”思路,而是采用编码-解码思路,以计算代替物理分光^[1-5,10-35].计算重构型微型光谱仪通过超表面结构设计、具有不同吸收光谱的宽谱滤波片阵列、或者具有不同响应光谱的探测器阵列等元件,对光谱进行编码,随后用探测器采集信号,最后使用计算机通过重构算法计算出入射光谱^[1-5,10-35].2015年,Bao和Bawendi^[10]利用具有不同吸收光谱的量子点滤波片阵列对入射光进行编码,结合CMOS探测器阵列实现了尺寸为毫米级的微型光谱仪,分辨率达5 nm;2019年,Yang等^[12]基于带隙随位置变化的单根纳米线制作了探测器阵列,实现了尺寸仅约100 μm 、分辨率达15 nm的微型光谱仪.计算重构型光谱仪无需复杂的分光与扫描部件,硬件结构简单,可以做到微米级尺寸和纳米级分辨率,是实现光谱仪微型化、片上化非常有潜力的解决方案.

对于计算重构型光谱仪,其工作步骤分为学习、采样、重构三步^[1-5].其中学习步骤是利用元器件对不同光谱入射光的特异性响应,实现对光谱的“编码”效果.设计具有编码效果的光学元器件是实现计算重构型光谱仪的核心步骤.如前所述,其可以是具有不同吸收光谱的宽谱滤波片阵列、具有不

同光电流响应谱的光电探测器阵列, 或对波长具有特异性调制作用的超表面阵列等 [8,10–15,27–29,31–33]. 除了上述的元件阵列思路以外, 还可以利用光响应谱线受外物理场可调谐的材料, 通过物理场非线性地调控单元器件的光电响应谱线, 实现等效探测器阵列的效果 (图 1) [16–25,30,34,35]. 这种基于响应光谱外场可调谐材料的微型光谱仪, 仅需单个元器件和极少的电极数量 (2—4 个), 无需任何分光计、干涉仪及滤波片, 即可实现高性能的光谱分辨功能, 我们称这种计算重构型光谱仪为极少电极单元器件微型光谱仪. 2017 年, Yuan 等 [16,36,37] 基于黑磷双栅极晶体管提出单元器件微型光谱仪的工作机制并于 2021 年实现, 是该方面的开拓性研究工作. 因极少电极单元器件微型光谱仪结构制备简单, 与硅基技术兼容, 并可做到微米级尺寸与纳米级的光谱

分辨率, 是光谱仪微型化、片上化的绝佳解决方案.

1.4 极少电极单元器件微型光谱仪原理

极少电极单元器件微型光谱仪基于计算重构的工作原理, 其工作步骤分为 3 步: 1) 学习; 2) 采样; 3) 重构. 其中, 学习这一步是构建入射光谱与元器件光电流之间的映射关系, 这种映射关系可以通过测量器件的光电响应矩阵实现, 也可以用多种已知光谱的光源照射训练神经网络来实现. 如图 2(a) 所示, 对于光电流与入射光功率呈线性关系的器件, 光电流 I_D 与入射光谱 P_λ 之间满足关系 $I_D = R_{D,\lambda} P_\lambda$. 其中 I_D 表示不同外物理场 D 下对应的光电流矢量, $R_{D,\lambda}$ 为外物理场 D 和波长 λ 依赖的光响应矩阵. 外物理场 D 可以是外电场、力场等. 对于光电流与入射光功率呈非线性关系的器

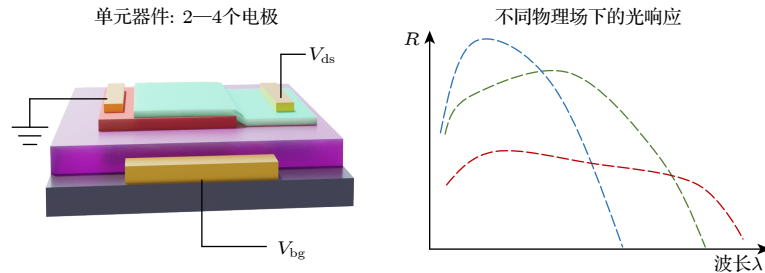


图 1 极少电极单元器件微型光谱仪示意图, 微型光谱仪仅需 2—4 个电极, 包括但不限于源漏电极、栅极等, 通过结构设计引入可调控的外物理场, 从而实现器件光响应谱的可逆、非线性调制

Fig. 1. Schematic diagram of the minimal-electrode miniaturized spectrometer, the spectrometer requires only 2–4 electrodes, including but not limited to source-drain electrodes and gate electrodes, external physical fields are introduced via the structure design, to realize the reversible and nonlinearly modulation of photoelectric response spectra of the device.

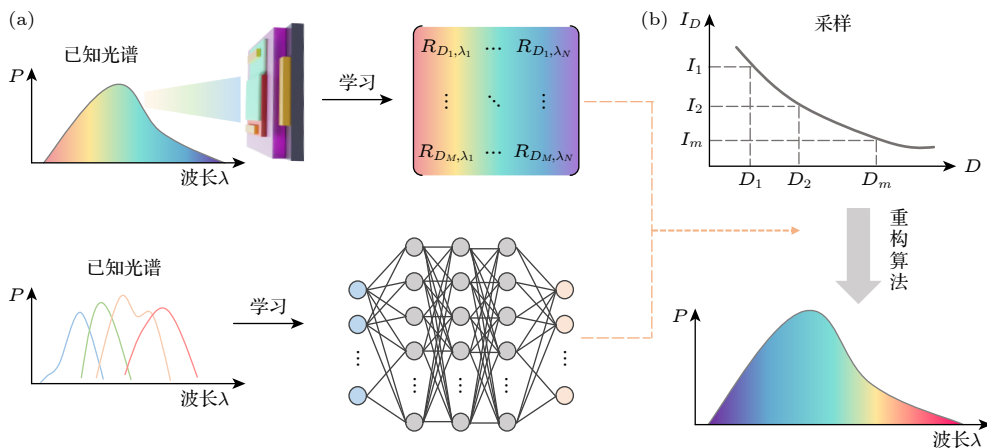


图 2 极少电极单元器件微型光谱仪的工作步骤示意图 (a) 通过“学习”步骤得到入射光谱与元器件光电流之间的映射关系; (b) “采样”和“重构”步骤, 测量未知光谱照射下的光电流向量 I_D , 利用算法重构得到入射光光谱

Fig. 2. Schematic diagram illustrating the operating procedures of a minimal-electrode miniaturized spectrometer: (a) Learning step: to obtain the mapping relationship between photocurrent and incident light spectra; (b) sampling step and reconstruction step, measuring the photocurrent vector I_D under the irradiation of an unknown spectrum, and obtaining the spectrum of incident light by reconstruction algorithms.

件, 其光电流 I_D 与入射光谱 P_λ 之间不满足线性对应关系, 所以不存在唯一确定的响应矩阵 $R_{D,\lambda}$. 对于这种器件, 需要用多种已知光谱的入射光作为训练集, 训练神经网络以构建 I_D 与 P_λ 之间的映射关系^[1,3]. 在采样这一步中, 探测器被置于未知光谱的照射下, 通过改变外部条件 D 得到探测器在不同 D 下的光电流 I_D (图 2(b)). 最后, 根据在学习这一步中得到的 I_D 与 P_λ 之间的映射关系 (响应矩阵或训练后的神经网络), 结合重构算法, 计算得到入射光谱 P_λ .

2 二维材料用于极少电极单元器件微型光谱仪的优势

二维材料是一类具有层状结构、层间由范德瓦耳斯力结合的材料体系, 代表性材料有石墨烯 (Gr)、二硫化钼 (MoS_2)、黑磷 (BP)、六方氮化硼 (hBN) 等. 由于层间范德瓦耳斯力较弱且材料表面无悬挂键, 这一特性使得二维材料可以自由组合成各种异质结构, 而无需考虑晶格失配问题. 此外, 二维材料还具有光电相互作用强、易受物理场调控等优异特性^[36-45], 在构建极少电极单元器件微型光谱仪方面具有很大的潜力, 有望实现高分辨率、宽光谱响应的微型光谱仪, 具有重要的研究与应用价值.

二维材料的带隙可以被多种因素有效地调节, 如材料层数、外加电场、应力等, 使得二维材料

具有丰富的可调节的光响应特性, 非常适合用于构建线性无关的光电响应矩阵, 应用于极少电极单元器件微型光谱仪中^[36-47]. 例如黑磷的带隙随层数减小而增加, 在 0.3—2.0 eV 之间可调^[38,46,47]. 在施加垂直二维平面方向电场的情况下, 利用斯塔克效应 (Stark effect) 等电场与物质相互作用效应, 黑磷的带隙可以进一步被可逆调控^[36,37,39-41]. 除了电场外, 还可以利用材料带隙随应变 (strain) 的变化, 通过施加应力的方式对材料的带隙进行调控^[42-45]. 例如 MoS_2 的带隙随着拉伸应力的增大而减小, 对于单层 MoS_2 材料, 其带隙在无应变状态下约为 1.82 eV, 在 1% 的拉伸应变下的带隙变为 1.78 eV^[42,45].

在实际应用中, 可以在二维材料器件中引入栅极结构, 当施加栅极电压时, 会在材料内部产生电场, 从而可以通过电场调控材料的带隙. 例如在基于黑磷的场效应晶体管结构中, 通过改变顶栅和底栅的电压, 可以实现黑磷带隙宽度从 300—50 meV 范围的调控 (图 3(a))^[36]. 利用材料的电致伸缩效应和随应变可调的带隙的特性, 可以通过电场引起材料形变, 从而间接地调节材料的带隙宽度. 例如在基于单层 MoS_2 的晶体管结构中, 可以通过施加栅压引起 MoS_2 的形变, 从而改变材料的带隙宽度 (图 3(b))^[20].

此外, 通过构建范德瓦耳斯异质结可以进一步丰富对带隙调控的策略. 二维材料原子级平整的表

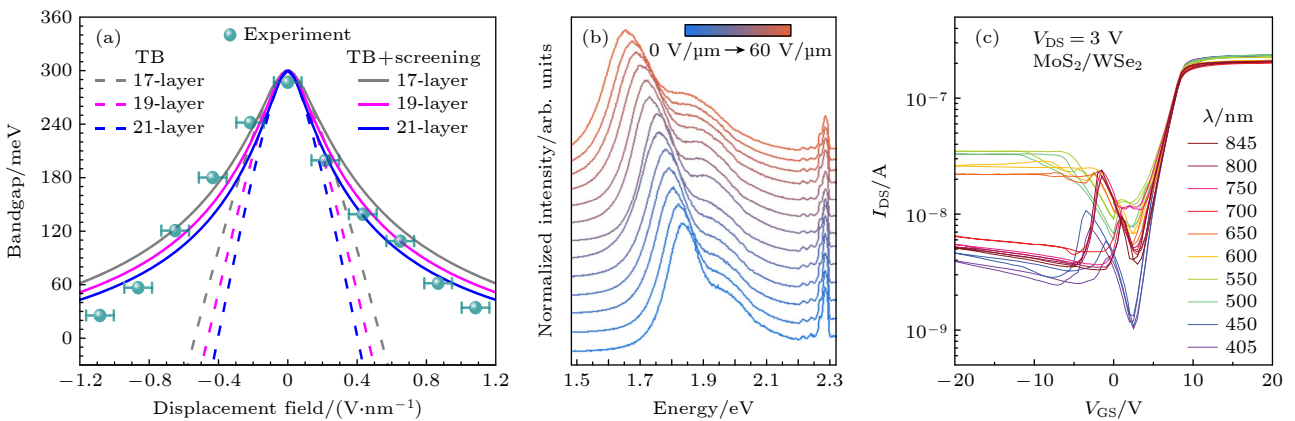


图 3 外物理场对二维材料带隙及异质结能带结构的调控作用 (a) 电场对 17 层、19 层、21 层黑磷薄膜带隙的调控作用, 实心点为实验值, 实线和虚线为理论计算值^[36]; (b) 不同外加电场下单层 MoS_2 的光致发光 (PL) 光谱, 发光峰位置随着电场增大而红移^[20]; (c) 不同波长入射光照射下 $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ 异质结的转移特性曲线^[18]

Fig. 3. The tunable bandgap and band structure of two-dimensional materials via external physical fields: (a) The experiment (dots) and calculated (lines) bandgap of BP films under external electric fields with layer numbers of 17, 19 and 21, respectively^[36]; (b) PL measurements of monolayer MoS_2 at different electric fields, fluorescence peak position occurs redshift with the increase of in-plane electric field intensity^[20]; (c) transfer curves of $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ heterojunction with illumination at different wavelengths^[18].

面和范德瓦耳斯力结合的特性,使得不同二维材料之间能够方便地进行堆叠和集成,形成组合丰富的异质结构,而无需担心晶格失配的问题.当两种或多种二维材料通过范德瓦耳斯力堆叠形成异质结时,异质结界面处的能带结构发生变化.通过改变偏压和栅压等外界条件,异质结的能带结构可以被有效地调控,形成随偏压和栅压可调的响应谱线^[17-19,22-25,34].例如,通过栅压可以调节 MoS₂/WSe₂ 异质结的能带结构,使其在 405—845 nm 波段呈现随栅压可调的响应光谱(图 3(c))^[18].通过偏压和栅压综合调节 NbTe₂/InSe 异质结的响应光谱,实现对光响应特性多维度的调控,可以增大光响应矩阵的信息密度,提高光谱重构的分辨率与准确率^[34].

3 基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪类型

自 2021 年基于黑磷晶体管的二维材料极少电极单元器件微型光谱仪被报道以来(实现了液氮温度下 2—9 μm 中红外光谱的重构)^[16],大量不同结构、不同材料的工作陆续被报道.2022 年, Yoon 等^[18]制备了首个基于范德瓦耳斯异质结的二维材料单元器件光谱仪,其使用栅压调控异质结界面能带结构来实现响应光谱的调控,实现了可见光光谱的重构.2024 年,基于 BP/MoS₂ 的单元器件光谱仪被报道,首次在室温下实现了单元器件光谱仪对

中红外光谱的重构^[23].同年,基于单层 MoS₂ 电致伸缩效应的光谱仪被报道,首次采用了“双信号”模式重构光谱^[20].此外还有基于超表面修饰的石墨烯微型光谱仪,其首次用二维材料光谱仪实现了偏振信号和波长信号的同时探测^[21].2025 年,基于 NbTe₂/InSe 异质结的微型光谱仪被报道,其采用偏压和栅压双通道调制,并成功应用在了化学成分检测上^[34].图 4 按照时间顺序展示了基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪的代表性工作^[16,18,20,21,23,34].

按照结构对极少电极单元器件微型光谱仪进行分类,可以分为晶体管结构、异质结结构、应变调控结构、超表面修饰结构等.我们也在表 1 中详细总结了不同类型代表性光谱仪的结构、性能等关键特性.其中,已报道的光谱仪工作分辨率既有采用双峰测量也有采用单峰测量.准确来讲,分辨率的测量应通过峰值相距 $\Delta\lambda$ 的双峰光谱作为入射光测得,在重构光谱能分辨双峰的情况下,最小的 $\Delta\lambda$ 即为光谱仪的分辨率.除此之外,重构准确性也应该作为重构型光谱仪的一个关键评价指标.重构准确性可以通过计算重构光谱与实际光谱之间的均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (CC) 来综合评判,前者评价绝对精度,后者看光谱形状保真度.在目前报道的文献中,光谱重构的 RMSE 和 CC 极少被讨论,缺乏与商用光谱仪重构准确性对比的定量指标.

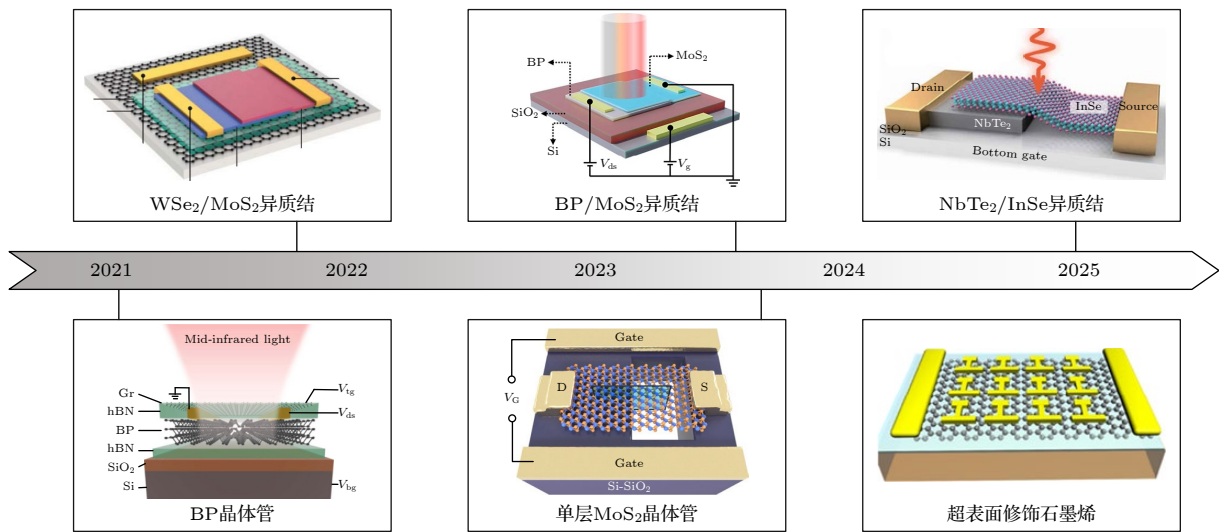


图 4 基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪的代表性工作,按时间顺序排列^[16,18,20,21,23,34]

Fig. 4. Representative works on different types of minimal-electrode miniaturized spectrometer based on two-dimensional materials (in time order)^[16,18,20,21,23,34].

表 1 基于二维材料的极少电极单元器件光谱仪的代表性工作

Table 1. Representative works on minimal-electrode miniaturized spectrometers based on two-dimensional materials.

类型	代表工作	电极数量	工作波长/nm	分辨率/nm	工作温度/K	工作原理
晶体管	BP [16]	4	2000—9000	90(单峰)	80	斯塔克效应
	MoS ₂ /WSe ₂ [18]	3	405—845	3(双峰)	300	界面能带调控
	BP/MoS ₂ [22]	2	500—1600	2(单峰)	300	界面能带调控
	BP/MoS ₂ [23]	3	1700—3600	43(单峰)	300	斯塔克效应等
异质结	GeSe/InSe [19]	2	400—1100	0.35(单峰)	300	界面能带调控
	ReS ₂ /Au/WSe ₂ [17]	3	1150—1470	20(单峰)	80	界面能带调控
	NbTe ₂ /InSe [34]	3	500—800	2.5(单峰)	300	界面能带调控
	SnS ₂ /ReSe ₂ [24]	3	400—800	5(单峰)	300	界面能带调控
	WSe ₂ p-i-n结 [25]	3	630—640	2(单峰)	300	界面能带调控
应变调控	MoS ₂ [20]	3	500—800	1.2(双峰)	300	电致伸缩效应
超表面	Gr + 超表面 [21]	2	1000—8000	500(单峰)	300	超表面调控

3.1 基于晶体管结构的极少电极单元器件微型光谱仪

基于晶体管结构的极少电极微型光谱仪由二维沟道材料、源极、漏极及 1—2 个栅极组成. 以黑磷双栅极晶体管的微型光谱仪为例, 其结构如图 5(a) 所示: BP 为沟道材料, 电极由源漏极、透明顶栅和底栅构成 [16]. 工作时, 入射光穿过顶层透明栅极到达黑磷沟道层, 基于光电导效应, 在源漏极偏压下进行光电流的收集. 同时, 在顶栅和底栅施加电压, 垂直方向电场与黑磷作用产生斯塔克效应, 从而对其带隙及光响应曲线进行调控 [16]. 图 5(b) 展示了在栅压电场作用下黑磷光电晶体管的光响应率矩阵, 随着电场 D 增大, 黑磷晶体管的响应截止波长红移, 从 $4 \mu\text{m}$ 逐渐拓展至 $9 \mu\text{m}$. 这种随栅压依赖的非线性光响应特性可以用于构建光响应矩阵, 通

过测量未知光照射时不同栅压下的光电流, 结合重构算法, 实现对入射光光谱的重构. 图 5(c) 虚线为根据普朗克定律计算的黑体辐射光源光谱, 在此黑体辐射光源的照射下, 黑磷光谱仪重构的光谱如实线所示, 与理论光谱几乎完全一致, 展现了该单元器件光谱仪的出色光谱探测能力.

3.2 基于范德瓦耳斯异质结的极少电极单元器件微型光谱仪

基于范德瓦耳斯异质结的微型光谱仪通常由多种二维材料通过范德瓦耳斯力堆叠而成, 相比于使用单一材料作为沟道材料, 采用异质结结构可以提供更为复杂、更易调控的能带结构, 更利于构建非线性的光响应率矩阵. 以 BP/MoS₂ 构成的 PN 异质结为例, 既可以通过偏压, 也可以通过栅压对

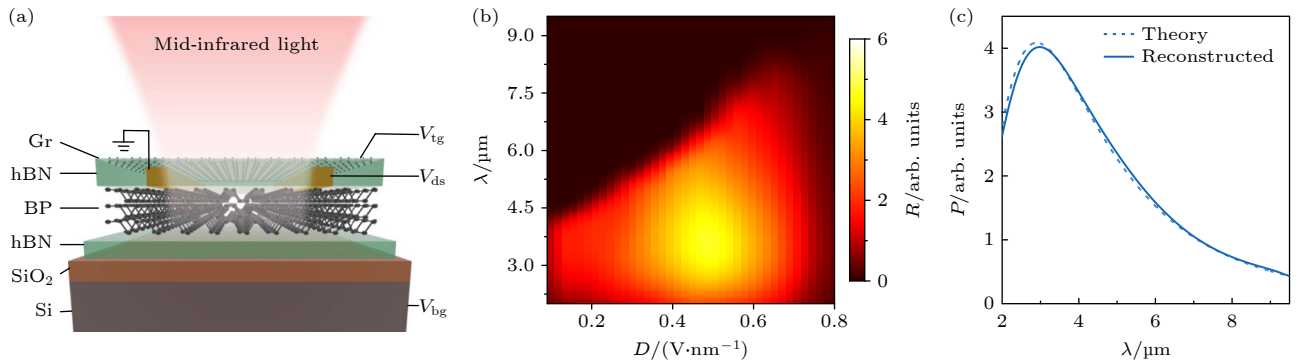


图 5 基于黑磷双栅极晶体管的极少电极单元器件微型光谱仪 [16] (a) 黑磷双栅极晶体管微型光谱仪的结构示意图; (b) 黑磷随电场 D 和波长 λ 依赖的光响应矩阵; (c) 黑磷单元器件光谱仪重构的光谱 (实线) 与入射黑体辐射光源的理论光谱 (虚线)

Fig. 5. Minimal-electrode miniaturized spectrometer based on a BP dual-gate transistor [16]: (a) Schematic diagram of the structure of the BP dual-gate transistor-based micro-spectrometer; (b) photoresponse matrix of the BP transistor as a function of electric field D and wavelength λ ; (c) reconstructed spectrum (solid line) from the BP micro-spectrometer and the theoretical spectrum (dashed line) of the incident blackbody radiation light source.

异质结的光响应谱线进行调制^[22,23]。图 6(a) 所示为用偏压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪示意图, 仅有源漏极偏压构成^[22]。图 6(b) 所示为光谱仪随偏压和波长依赖的响应矩阵, 可以看到 BP/MoS₂ 的响应光谱受到了偏压的有效调控: 在 BP 端加正偏压时, 光生载流子主要以热激发的方式越过 BP/MoS₂ 界面处的势垒; 加负偏压时, 光生载流子主要以隧穿的方式穿过势垒 (图 6(c))^[22]。图 6(d) 所示为该

偏压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪在 500—800 nm 波段的光谱重构结果, 入射光谱半高宽为 10 nm。图 6(e) 为用栅压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪示意图, BP/MoS₂ 异质结用于探测入射的红外光, 硅作为底栅来调制 BP/MoS₂ 的响应光谱^[23]。在正栅压下, 由于斯塔克效应 (Stark effect) 和量子限制法兰兹-卡尔迪西效应 (QCFK effect) 的作用, P 型黑磷的带隙减小, 光响应谱线的截止波长红移; 在

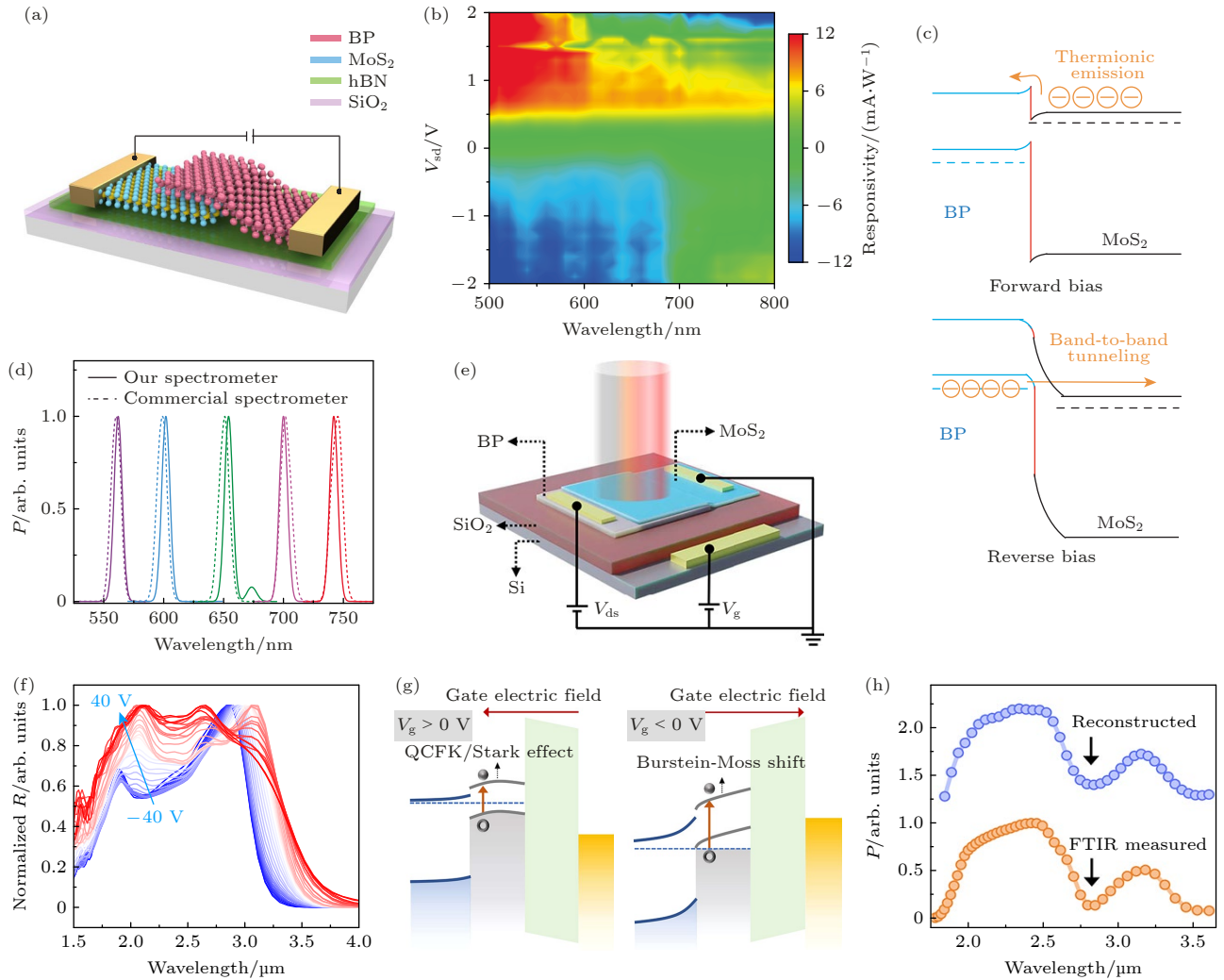


图 6 基于范德瓦耳斯异质结的极少电极单元器件微型光谱仪^[22,23] (a) 使用偏压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪示意图^[22]; (b) 偏压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪随偏压 V_{ds} 和波长 λ 依赖的光响应矩阵^[22]; (c) BP/MoS₂ 异质结在正偏压和负偏压下的能带结构示意图^[22]; (d) BP/MoS₂ 光谱仪重构光谱 (实线) 与商用光谱仪测试结果 (虚线)^[22]; (e) 使用栅压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪示意图^[23]; (f) 栅压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪在不同栅压 V_g 下的响应谱线^[23]; (g) BP/MoS₂ 异质结在正栅压和负栅压下的能带结构示意图^[23]; (h) BP/MoS₂ 光谱仪重构光谱 (蓝色线) 与商用光谱仪测试结果 (橙色线)^[23]

Fig. 6. Minimal-electrode miniaturized spectrometer based on van der Waals heterostructures^[22,23]: (a) Schematic of the BP/MoS₂ spectrometer tuned by bias voltage^[22]; (b) photoresponse matrix of the bias-tunable BP/MoS₂ spectrometer as a function of bias voltage V_{ds} and wavelength λ ^[22]; (c) schematic diagram of the band structure of the BP/MoS₂ heterojunction under positive and negative bias voltages^[22]; (d) reconstructed spectrum from the BP/MoS₂ spectrometer (solid line) and the measured spectrum from a commercial spectrometer (dashed line)^[22]; (e) schematic of the BP/MoS₂ spectrometer tuned by gate voltage^[23]; (f) response spectra at different gate voltages V_g of the BP/MoS₂ spectrometer^[23]; (g) schematic diagram of the band structure of the BP/MoS₂ heterojunction under positive and negative gate voltages^[23]; (h) reconstructed spectrum from the BP/MoS₂ spectrometer (blue line) and the measured spectrum from a commercial spectrometer (orange line)^[23].

负栅压下, 黑磷中的电子受栅极电场被排斥, 黑磷的费米能级降低, 受莫斯-布尔斯坦效应 (Moss-Burstein effect) 影响, 黑磷的光响应截止波长蓝移 (图 6(f), (g))^[23]. 图 6(h) 所示为用栅压调制的 BP/MoS₂ 光谱仪对中外红外入射光源的重构结果. 重构光谱 (蓝色线) 与商用傅里叶红外光谱仪测试结果 (橙色线) 基本一致, 但该 BP/MoS₂ 光谱仪尺寸仅为 30 μm × 50 μm, 远小于商用傅里叶红外光谱仪.

使用范德瓦耳斯异质结结构的另一个优势是, 异质界面处形成内建电场, 促进光生载流子的分离, 增强了光电流响应, 使光谱仪具有更高的探测信噪比. 例如, 基于黑磷双栅极晶体管的微型红外光谱仪需要在液氮温度下才能工作, 而采用 BP/MoS₂ 异质结结构的红外光谱仪在室温下即可实现理想的光谱重构^[22,23].

由于二维材料种类丰富、堆叠制备器件方便, 基于范德瓦耳斯异质结的微型光谱仪在材料选择和工作波段上涵盖范围十分广泛. 在可见光波段, 有

基于 MoS₂/WSe₂ 异质结、GeSe/InSe 异质结、NbTe₂/InSe 异质结、SnS₂/ReS₂ 异质结、WSe₂ p-i-n 同质结等材料组合的光谱仪^[18,19,22,24,25,34]; 在近红外波段, 有 ReS₂/Au/WSe₂ 异质结^[17]; 在中红外波段, 有 BP/MoS₂ 异质结 (涵盖可见光至中红外波段) 等^[22,23].

3.3 基于电致伸缩效应的极少电极单元器件微型光谱仪

单层 MoS₂ 等二维材料在电场作用下可产生电致伸缩现象, 其应变产生的带隙变化, 可以实现电场对二维材料带隙及光响应曲线的调控, 使得基于此效应构建二维材料微型光谱仪成为可能^[20,42]. 以单层 MoS₂ 为例, 单层 MoS₂ 的带隙随拉伸应变的增大而减小. 同时, 光生载流子的复合寿命也会随着拉伸应变的增大而减小, 造成光电流的弛豫时间减小^[20].

基于电致伸缩效应对单层 MoS₂ 带隙和弛豫时间的调控作用, 通过栅极电压产生面内电场,

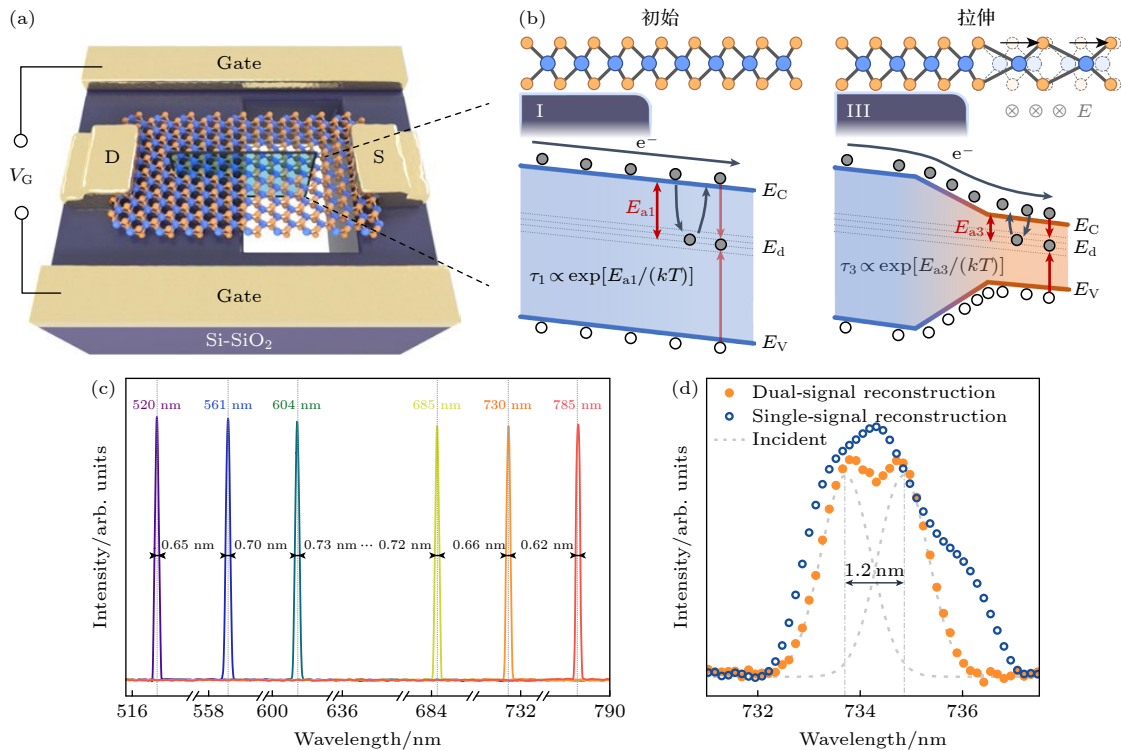


图 7 基于电致伸缩效应的极少电极单元器件微型光谱仪^[20] (a) 基于电致伸缩效应的 MoS₂ 单元器件微型光谱仪器件结构示意图; (b) 单层 MoS₂ 在初始状态 (左图) 和面内电场作用下 (右图) 的晶格结构示意图, 以及对应的能带结构示意图; (c) MoS₂ 微型光谱仪对 500—800 nm 波长范围内的单峰高斯光谱重构效果, 重构光谱的半高宽标注在图中; (d) 双信号与单信号模式对于间距 1.2 nm 的双峰光谱重构效果

Fig. 7. Minimal-electrode miniaturized spectrometer based on the electrostrictive effect^[20]: (a) Schematic of the MoS₂ miniaturized spectrometer based on the electrostrictive effect; (b) schematic diagrams of the lattice structure and band structure of monolayer MoS₂ in the initial state (left panel) and under the in-plane electric field (right panel); (c) the reconstructed spectra of monochromatic peaks and the corresponding full-width at half-maximum over the entire operational waveband; (d) the dual- and single-signal reconstructed spectra of the dichromatic light with a 1.2 nm wavelength spacing.

同步调控光电响应幅度和弛豫时间,从而能够实现双信号光谱重构^[20].图7(a)为基于单层MoS₂电致伸缩效应的光谱仪结构示意图.MoS₂左半部分固定在硅片上,右半部分悬空.在施加面内方向的电场时,悬空部分受到电致伸缩效应而发生拉伸应变,带隙减小,同时光电流弛豫时间也减小(图7(b)).在未知光谱的脉冲光照射下,采集不同面内电场下的光电流随时间变化的波形图,分析得到光电流的幅值和弛豫时间.这种幅值和弛豫时间双信号采集的模式显著增加了响应矩阵的维度,同时结合深层神经网络(DNN)算法,幅值信号与弛豫时间信号可以交互验证,显著提高了重构光谱的分辨率和可信度.实验结果表明,该类型光谱仪能够在450—800 nm的光谱范围内,实现单色光0.6 nm半高宽和双色光1.2 nm分辨率的光谱重建,如图7(c),(d)所示^[20].

3.4 基于超表面修饰二维材料的极少电极微型光谱仪

随着微纳加工技术的发展成熟,金属超表面修饰对二维材料光电特性的影响得到了越来越多的

研究.通过在二维材料表面蒸镀或转移纳米天线(nanoantenna)构成的超表面,可以有效调控材料对入射光的吸收特性,便于构造响应矩阵,从而应用在微型光谱仪中^[21].由于纳米天线对入射光的吸收具有波长和偏振依赖的特性,且这一特性会受到纳米天线的尺寸、形状、方向等条件的影响,因此可以通过在石墨烯等二维材料表面覆盖不同尺寸的金属纳米天线阵列来制备微型光谱仪,用来重构未知光谱的波长和偏振信息.如图8(a)所示为基于超表面修饰石墨烯的微型光谱仪,其具有源极和漏极两个电极,电极间的石墨烯覆盖有“工”字形的金属超表面阵列.工作时,需要用到3个具有不同朝向的超表面修饰石墨烯探测器,让入射光分别照射在3个不同的探测器上并采集光电流信号.通过综合分析这3个探测器的光电流信号,结合神经网络算法可以得到入射光的波长和偏振信息(图8(b)).图8(c)所示为超表面修饰石墨烯微型光谱仪的重构结果,其预测波长和偏振与真实的基本一致.其工作波长范围达到1—8 μm,波长预测精度0.5 μm,并且可以分辨左圆偏与右圆偏光^[21].此工作中的石墨烯微型光谱仪虽然可以同时得到波

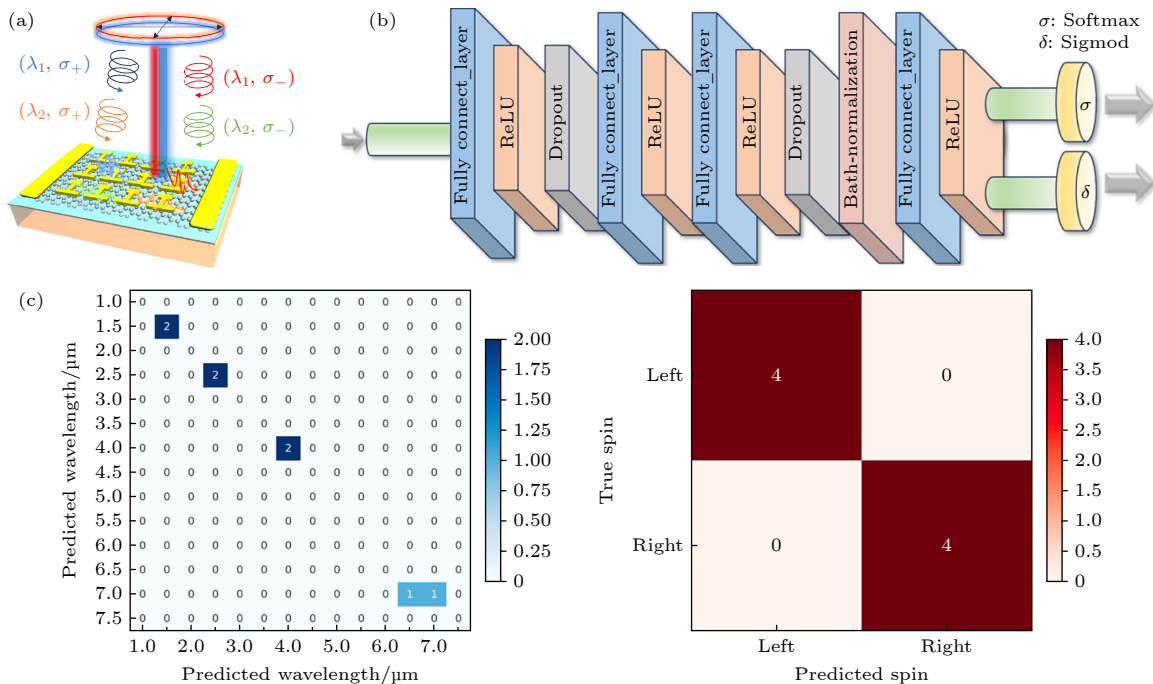


图8 基于超表面修饰二维材料的极少电极微型光谱仪^[21] (a) 基于超表面修饰的石墨烯探测器的微型光谱仪示意图; (b) 训练的神经网络示意图,该网络由输入层、输出层,以及若干隐藏层构成; (c) 该石墨烯微型光谱仪对入射光波长和偏振的重构结果

Fig. 8. Minimal-electrode miniaturized spectrometer based on the metasurface-modified two-dimensional materials^[21]: (a) Schematic diagram of a miniaturized spectrometer based on a metasurface-modified graphene detector; (b) schematic diagram of the neural network training for reconstruction spectra, which consists of an input layer, an output layer, and several hidden layers; (c) reconstruction results of the incident light wavelength and polarization by the graphene miniaturized spectrometer.

长和偏振信息,但其输出其实只有“波长”和“左圆偏或右圆偏”两个参数,仅可准确识别单波长的圆偏振光谱,离获得完整的光谱信息还有一定距离.其原因是输入量为每个探测器的光电流,输入量维度完全取决于探测器的数量,若想保持“极少电极”的优势,则输入量维度必定不足,即使用神经网络算法也无法重构出复杂的光谱信息.后续工作可以引入电场、应变等可以连续调控的外物理场,沟道材料也可以换成 BP, MoS₂ 等更易于调控的二维半导体材料,让单个探测器可以实现等效多探测器的功能,从而可以重构更完整的光谱信息.

4 总结与展望

基于二维材料的极少电极微型光谱仪的研究在取得快速发展的同时,也面临着系列的挑战.极少电极微型光谱仪通过有限的物理电极施加一系列不同的电场,从而动态地调制或“编程”单个或少量探测器单元的光谱响应函数,获得一组线性无关的测量值.因此,极少电极微型光谱仪面临的信息瓶颈由“可区分的有效测量状态数量”决定,并受多个方面影响,包括二维材料与器件制备、结构设计、光电探测性能、光谱重构算法等.

4.1 材料与器件制备

尽管近年来二维材料的制备方法一直在发展更新、材料薄膜质量取得了很大进展,但为了实现在大规模集成器件上的应用,在材料获取、硅基光电技术的兼容性、光谱仪片上系统构建等方面还有问题需要解决.在材料获取方面,大面积、高质量二维材料的制备一直是一个亟待解决的难题.目前高质量二维材料主要通过机械剥离获得,产量低、尺寸小,难以满足大规模集成应用的需求.化学气相沉积(CVD)可以用于制备大面积二维材料,但在制备过程中,难以精确控制材料的生长参数(如温度、气体流量、反应时间等),导致制备出的二维材料可能存在厚度不均匀、晶界较多等问题,影响材料的光电性能.除此之外,还需要攻克二维材料的大面积无损转移或者异质结的大面积生长技术.二维材料的优势在于其原子级厚度、强光-物质相互作用、可调谐光电特性等,其可以作为硅基光电芯片上的高性能活性层,构建混维异质结集成系统.其缺点在于二维材料较脆弱,对高温、等离子

体、化学刻蚀剂敏感.如黑磷在空气中会与水和氧气反应形成磷氧化物,导致光学和电学性能退化.此外,标准的 CMOS 工艺(如高温退火、离子注入、反应离子刻蚀)可能破坏其晶体结构和性能.为了解决这一问题,可以在所有高温、高能硅工艺完成后,最后集成二维材料.随着金属电极阵列转移技术的持续发展,可为二维材料集成的发展提供了更多的可能性^[48,49].集成后采用氧化铝或 hBN 等钝化层封装,防止后续工艺和环境降解.为了构建包含光源、光谱仪、处理器的完整片上系统,首先需要配合低噪声放大器、滤波器、模数转换器等元器件,将二维材料的光电流信号转化成稳定的数字信号.此外可以在同一个硅芯片上,紧邻二维材料器件设计制造专用的 CMOS 读出集成电路,缩短数据传输的时间和功耗.更进一步地,可以在片上集成微型化的数字信号处理器或存内计算单元,专用于运行重构算法,实现实时输出光谱,实现感存算一体架构^[50].

4.2 器件设计与光响应矩阵构建

微型光谱仪之所以能够重构未知光谱,物理原理上的核心是探测器具有随外物理场非线性调控的响应谱线,即线性无关的响应矩阵,因此在采样步骤能够得到数量足够多的有效方程,用于解方程重构出光谱.在使用相同重构算法的前提下,响应矩阵的秩越高,理论上重构光谱的分辨率越高,如图 9(a) 所示^[26].在实验中,可以通过增加采样点密度来提高响应矩阵的秩,如图 9(b) 所示^[26].例如,对于电场调控的探测器,可以增加电场采样点的数量.但实际实验中,随着电场采样点增加到一定的数量,矩阵的秩并不会随之增加,而是基本保持不变^[26].这是由于随着电场采样点增加,相邻电场采样点对应的响应光谱之间区分度越来越低,并没有增加响应矩阵的有效信息.因此,为了提高采样响应矩阵信息密度,需要寻找光谱随电场等外部条件能剧烈变化的材料体系.此外,随着采样点数量的增加,响应矩阵维度增加,噪声的影响被指数级地放大,因此降低器件噪声,提高探测信噪比,也是微型光谱仪器件设计中非常重要的考虑因素.此外,对于极少电极单元器件光谱仪,由于其学习和采样过程中需要不断改变电场等外物理场来调节响应光谱,因此器件的稳定性对于重构准确性有着至关重要的影响.在学习过程中和采样过程中,如果

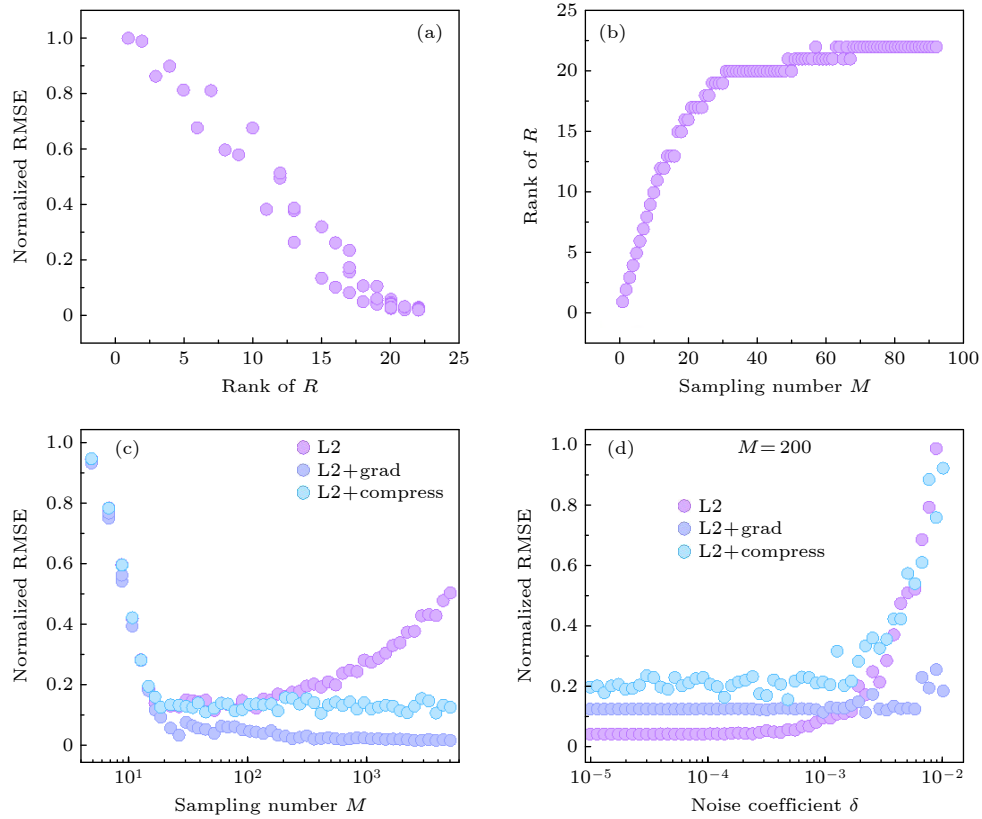


图 9 矩阵的秩、采样点数、噪声等因素对光谱重构准确度的影响^[26] (a) 重构光谱的 RMSE 随响应矩阵的秩的变化; (b) 响应矩阵的秩随采样点数 M 的变化; (c), (d) 正则化算法 (L2)、引入梯度下降法的正则化 (L2+Grad)、引入压缩感知的正则化 (L2+Compress) 这三种算法下, 重构光谱的 RMSE 随采样点数 M (c) 和噪声系数 δ (d) 的变化

Fig. 9. The impact of rank of responsivity matrix R , sampling number, and noise on the reconstruction accuracy of spectra^[26]: (a) RMSE of reconstructed spectra as a function of the rank of R ; (b) rank of R as a function of sampling number M ; (c) obtained RMSE as a function of M using different algorithms (L2: L2 regression algorithm; L2+Grad: L2 regression with gradient descent algorithm; L2+Compress: L2 regression with compressed sensing algorithm); (d) obtained RMSE as a function of noise coefficient δ using different algorithms.

对应外物理场的响应谱线出现变化, 在矩阵运算下误差会成几何倍数地放大, 导致重构结果出现显著偏差. 对于栅压电场调节的器件, 栅极电场调控的滞回效应也是不可忽视的. 减少界面的缺陷, 例如采用原子级平整的 hBN 作为介电层, 可以减弱栅极电场调控的滞回效应^[18].

在构建线性无关响应矩阵方面, 早期二维材料极少电极微型光谱仪选用的是具有电场可调控带隙的材料, 例如黑磷. 在斯塔克效应的作用下, 黑磷的带隙随垂直方向电场的增大而减小, 从而产生随电场非线性调控的光响应谱线^[36-41]. 随着二维材料微型光谱仪的材料体系不再局限于单一沟道材料, 而是更多地采用范德瓦耳斯异质结结构, 以及随着电场对光电流响应机理的更深入研究, “带隙可调”这一特性不再是制备微型光谱仪的材料必须特性. 材料选择上, MoS_2 , WSe_2 , ReS_2 等过渡

金属二硫化物参与构成的异质结被应用于微型光谱仪中^[17-19,22-25,34]. 基于范德瓦耳斯异质结的微型光谱仪主要利用电场对异质结界面能带结构的调控作用, 不需要带隙随电场改变, 因此在材料选择上更为广泛. 在提高探测信噪比方面, 使用异质结结构的微型光谱仪具有很大优势, 因为异质结界面处存在内建电场, 可以在零偏压下工作, 与使用单一材料的晶体管结构相比, 大大降低了暗电流, 提高了信噪比^[16,23]. 此外, 异质结的材料组合选择丰富, 更容易推广到各种材料体系, 包括与传统硅基材料或 III-V 族半导体材料组合等^[30].

4.3 光谱重构算法

光谱重构算法对微型光谱仪重构光谱的分辨率和准确度有着决定性影响. 常用的光谱重构算法有最小二乘法回归 (least squares regression)、主

成分分析 (principal component analysis)、正则化算法 (regularization algorithm) 等. 对于采样光电流向量 I_{ph} , 响应矩阵 R , 重构光谱向量 P , 最小二乘法回归算法是使 $\|RP - I_{\text{ph}}\|_2^2$ 最小, 其简单易用, 但对噪声极为敏感, 当测量数据中存在噪声时, 重构结果的误差会显著增大^[27]. 主成分分析算法通过奇异值分解等线性代数手段提取主要信息来降低数据维度, 但在处理复杂光谱时, 可能会丢失部分重要信息, 导致重构精度不足. 正则化算法, 例如吉洪诺夫正则化算法 (又称 L2 正则化算法), 通过引入正则化量来显著增加对噪声的容忍度, 目标是使 $\|RP - I_{\text{ph}}\|_2^2 + \gamma \|P\|_2^2$ 最小, 其中 γ 是正则化系数, 具有较好的重构稳定性和准确性, 是目前最常用的重构算法之一^[16-18,22-24,51]. 在正则化算法的基础上, 还可以引入压缩感知算法、梯度下降算法等方法来进一步提高对噪声的容忍度. 压缩感知算法可以去掉部分冗余信息, 减小采样点数过多时带来的噪声 (图 9(c)). 梯度下降算法以小步长更新重构结果以逐步最小化目标函数, 可以避免常规正则化算法的过拟合问题, 在高噪声水平下仍可以保持较好的重构准确度 (图 9(d)). 然而, 以上的光谱重构算法均基于线性模型, 只适用于光电流与入射光强度成正比的情况. 而实际的光谱响应过程可能存在非线性因素, 如光电流的非线性功率响应、光电流随时间的变化等, 而线性模型无法准确描述这种非线性关系, 从而导致光谱重构精度下降.

为了克服现有算法的局限性, 机器学习和深度学习等新型算法被引入基于二维材料的微型光谱仪的光谱重构中^[1,2,4,5,19,25,34,35]. 机器学习算法具有强大的非线性拟合能力, 能够处理复杂的光谱数据. 深度学习算法 (如卷积神经网络等) 在处理高维、复杂的光谱数据时表现出更优异的性能. 卷积神经网络能够自动提取光谱数据中的特征信息, 减少人工特征选择的工作量, 提高光谱重构的效率和精度. 目前, 基于深度学习的光谱重构算法已在基于二维材料的微型光谱仪中取得了一定的研究成果, 并且在近年来的工作中得到了越来越多的使用. 例如, 基于 GeSe/InSe 异质结的微型光谱仪, 其光电流与入射光功率呈现非线性的幂函数关系, 无法使用正则化算法等线性算法重构, 但利用人工神经网络对该光谱仪的响应数据进行训练, 实现了对复杂光谱的高精度重构, 光谱分辨率达 0.35 nm^[19].

综上所述, 基于二维材料的极少电极单元器件

微型光谱仪作为一种新型的光谱检测技术, 具有体积小、功耗低、响应迅速等特点, 在现场快速光谱分析、便携光电子器件、智能驾驶等方面具有重要应用前景. 其研究核心是通过优化电场调制效果、筛选强非线性响应材料、设计最优的电场采样序列等方法来最大化响应矩阵的有效秩, 结合压缩感知、神经网络等算法, 在硬件瓶颈下挖掘出最大的信息解码能力. 同时, 在二维材料发展起来的极少电极微型光谱仪的原理也逐渐被推广到传统半导体体系, 例如 GaAs, GaN 等体系, 极大推动了微型光谱仪的发展^[30,52,53]. 尽管基于二维材料的极少电极片上微型光谱仪的研究领域目前还面临诸多挑战, 但随着材料制备技术的不断进步、器件结构的持续优化以及光谱重构算法的不断创新迭代, 其性能将不断提升, 有望在生物医学、环境监测、食品安全等领域发挥作用, 推动光谱检测技术的微型化、低成本化和智能化发展.

参考文献

- [1] Yuan S F, Ma C, Fetaya E, Mueller T, Naveh D, Zhang F, Xia F N 2023 *Science* **379** 6637
- [2] Wang F K, Fang S, Zhang Y, Wang Q J 2025 *Nat. Commun.* **16** 6791
- [3] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, Hasan T 2021 *Science* **371** 6528
- [4] Ballard Z, Brown C, Madni A M, Ozcan A 2021 *Nat. Mach. Intell.* **3** 556
- [5] Gao L, Qu Y R, Wang L H, Yu Z F 2022 *Nanophotonics* **11** 2507
- [6] Redding B, Liew S F, Sarma R, Cao H 2013 *Nat. Photonics* **7** 746
- [7] Gatkine P, Veilleux S, Hu Y, Bland-Hawthorn J, Dagenais M 2017 *Opt. Express* **25** 15
- [8] Pohl D, Reig Escalé M, Madi M, Kaufmann F, Brotzer P, Sergeev A, Guldemann B, Giaccari P, Alberti E, Meier U, Grange R 2020 *Nat. Photonics* **14** 24
- [9] Wang H L, Lü J G, Liang J Q, Liang Z Z, Qin Y X, Wang W B 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 060702 (in Chinese) [王洪亮, 吕金光, 梁静秋, 梁中翥, 秦余欣, 王维彪 2018 *物理学报* **67** 060702]
- [10] Bao J, Bawendi M G 2015 *Nature* **523** 7558
- [11] Wang Z, Yi S Y, Chen A, et al. 2019 *Nat. Commun.* **10** 1020
- [12] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. 2019 *Science* **365** 1017
- [13] Zhu Y B, Lei X, Wang K X, Yu Z F 2019 *Photonics Res.* **7** 961
- [14] Kong L D, Zhao Q Y, Wang H, et al. 2021 *Nano Lett.* **21** 9625
- [15] Fan Y D, Huang W A, Zhu F, Liu X S, Jin C Q, Guo C Z, An Y, Kivshar Y, Qiu C W, Li W 2024 *Nature* **630** 77
- [16] Yuan S F, Naveh D, Watanabe K, Taniguchi T, Xia F N 2021 *Nat. Photonics* **15** 601
- [17] Deng W J, Zheng Z L, Li J Z, et al. 2022 *Nat. Commun.* **13** 4627

- [18] Yoon H H, Fernandez H A, Nigmatulin F, et al. 2022 *Science* **378** 296
- [19] Darweesh R, Yadav R K, Adler E, Poplinger M, Levi A, Lee J J, Leshem A, Ramasubramaniam A, Xia F N, Naveh D 2024 *Sci. Adv.* **10** eadn6028
- [20] Du X C, Wang Y, Cui Y, et al. 2024 *Nat. Electron.* **7** 984
- [21] Jiang H, Chen Y Z, Guo W Y, Zhang Y, Zhou R G, Gu M L, Zhong F, Ni Z H, Lu J P, Qiu C W, Gao W B 2024 *Nat. Commun.* **15** 8347
- [22] Uddin M G, Das S, Shafi A M, et al. 2024 *Nat. Commun.* **15** 571
- [23] Wang H, Chen S H, Chen X L 2024 *Nano Lett.* **24** 326
- [24] Wu G, Abid M, Zerara M, Cho J, Choi M, Ó Coileáin C, Hung K M, Chang C R, Shvets I V, Wu H C 2024 *Nat. Commun.* **15** 676
- [25] Li X, Wang J, Yu F L, Chen J, Chen X S, Lu W, Li G H 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 47
- [26] Wang H, Wang Z Y, Miao J S, Yu X L, Chen X L 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** e01717
- [27] Xiao Y Z, Wan C H, Salman J, Maywar I J, King J, Shahsafi A, Kats M A 2021 *Laser Photonics Rev.* **15** 2100121
- [28] He X, Li Y Z, Yu H, Zhou G D, Ke L Y, Yip H L, Zhao N 2024 *Nat. Electron.* **7** 674
- [29] Tian M H, Liu B L, Lu Z L, Wang Y, Zheng Z, Song J Q, Zhong X L, Wang F 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 278
- [30] Wang J Y, Pan B B, Wang Z, et al. 2024 *Nat. Commun.* **15** 1773
- [31] Yang W K, Wang Z J, Xu J, Dong D S, Cao G Y, Lin H, Jia B H, Liu L G, Shi K B 2024 *Light Adv. Manufact.* **5** 44
- [32] Zhou J, Zhang H, Qiao Q F, et al. 2024 *Nat. Commun.* **15** 10260
- [33] Zhang Z M, Xiao S M, Song Q H, Xu K 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 130
- [34] Cui X Q, Nigmatulin F, Wang L, et al. 2025 *Sci. Adv.* **11** eado6886
- [35] Zhang Z, Huang B J, Chen H D 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 140701 (in Chinese) [张赞, 黄北举, 陈弘达 2024 物理学报 **73** 140701]
- [36] Deng B C, Tran V, Xie Y J, et al. 2017 *Nat. Commun.* **8** 14474
- [37] Chen X L, Lu X B, Deng B C, et al. 2017 *Nat. Commun.* **8** 1672
- [38] Huang S Y, Zhang G W, Wang F J, Lei Y C, Yan H G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 027802 (in Chinese) [黄申洋, 张国伟, 汪凡洁, 雷雨晨, 晏湖根 2021 物理学报 **70** 027802]
- [39] Liu Y P, Qiu Z Z, Carvalho A, Bao Y, Xu H, Tan S J R, Liu W, Castro Neto A H, Loh K P, Lu J 2017 *Nano Lett.* **17** 1970
- [40] Whitney W S, Sherrott M C, Jariwala D, Lin W H, Bechtel H A, Rossman G R, Atwater H A 2017 *Nano Lett.* **17** 78
- [41] Lei Y C, Ma J W, Luo J M, et al. 2023 *Nat. Commun.* **14** 5314
- [42] Conley H J, Wang B, Ziegler J I, Haglund R F Jr., Pantelides S T, Bolotin K I 2013 *Nano Lett.* **13** 8
- [43] Huang S Y, Wang F J, Zhang G W, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 156802
- [44] Kim H, Uddin S Z, Lien D H, Yeh M, Azar N S, Balendhran S, Kim T, Gupta N, Rho Y, Grigoropoulos C P, Crozier K B, Javey A 2021 *Nature* **596** 7871
- [45] Das S, Das S 2022 *Nano Lett.* **22** 9252
- [46] Zhang G W, Huang S Y, Chaves A, Song C Y, Özçelik V O, Low T, Yan H G 2017 *Nat. Commun.* **8** 14071
- [47] Li L K, Kim J, Jin C H, et al. 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 21
- [48] Xing K J, McEwen D, Yin Y F, et al. 2025 *ACS Nano* **19** 3579
- [49] Yu L X, Gao M L, Lv Q, Ma H Y, Shang J Z, Huang Z H, Sun Z, Yu T, Kang F Y, Lv R T 2024 *ACS Nano* **18** 33131
- [50] Shi Q, Tian M X, Yang Q, Zhang X W, Zhan Y D 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 228501 (in Chinese) [石旗, 田茂鑫, 杨权, 张晓伟, 赵昱达 2025 物理学报 **74** 228501]
- [51] Tikhonov A N, Goncharov A V, Stepanov V V, Yagola A 1995 Numer. Methods Approx. Sol. Ill-Posed Probl.
- [52] Zhang J Y, Wang H, Qin L, et al. 2025 *Photon. Res.* **14** 49
- [53] Yu H B, Memon M H, Yao M J, et al. 2025 *Nat. Photon.* **19** 1322

SPECIAL TOPIC—2D materials and future information devices

Miniaturized spectrometers with minimal electrode unit devices based on two-dimensional materials*

WANG Han CHEN Xiaolong[†]

(Department of Electronic and Electrical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

(Received 24 November 2025; revised manuscript received 31 December 2025)

Abstract

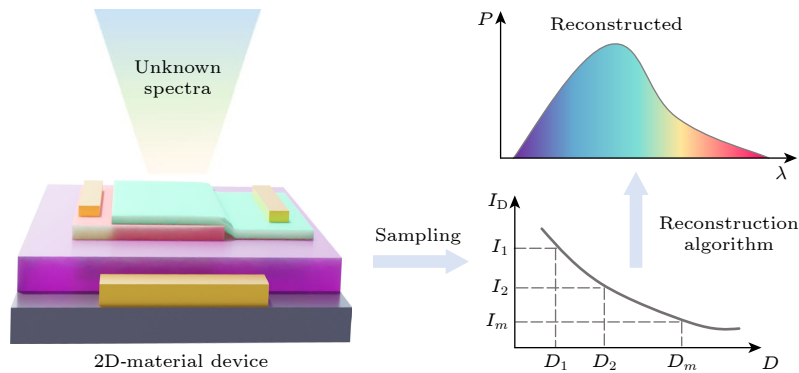
Spectrometers are the devices which can acquire multi-dimensional information of incident light including intensity and wavelength. They have broad applications in both laboratory and industrial fields. Nevertheless, spectrometers relying on gratings or Michelson interferometers are inherently bulky, which restricts their

* Project supported by the Excellent Youth Program of Shenzhen, China (Grant No. RYX20221008092900001).

† Corresponding author. E-mail: chenxl@sustech.edu.cn

integration and deployment in portable devices. Consequently, the miniaturization and on-chip integration of spectrometers are crucial for the advancement of next-generation optoelectronic devices. Two-dimensional (2D) materials, with unique characteristics including atomic-scale thickness, absence of surface dangling bonds, and versatile band structure modulation capabilities, show great potential for fabricating on-chip miniature spectrometers.

This review focuses on micro-spectrometers with minimal electrodes based on 2D materials, and provides a detailed analysis of their device configurations, working principles, advantages, and existing limitation. Unlike array-based or tunable-filter spectrometers, the devices with few-electrode architectures utilize physical effects such as the Stark effect, quantum tunneling, and electrostriction to encode spectral information into electrical signals, thereby achieving spectral reconstruction and greatly reducing device footprint and complexity. We conduct a systematic categorization and evaluation of representative implementations of these spectrometers. Through a comparison of their key metrics, such as spectral resolution, operational bandwidth, response speed, and reconstruction accuracy, we clarify the underlying physical mechanisms that determine their performance. In addition to conducting a comprehensive survey of cutting-edge devices, we perform a critical assessment of the long-standing challenges within the field. These challenges include the scalable and reproducible material synthesis, the stable integration of devices with silicon photonics and readout circuits, the environmental stability of 2D materials, and the optimization of computational algorithms for reliable spectral retrieval under the conditions of noise or limited data. Finally, we outline future research directions with the aim of improving device performance and putting them into practical applications in on-chip photonic systems. This review is expected to provide useful information for researchers engaged in the research on ultra compact miniaturized spectrometers and to promote innovation in ultra compact spectral sensing technologies.



Keywords: two-dimensional materials, miniaturized spectrometers, photodetection, electric tunable

DOI: [10.7498/aps.75.20251596](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251596)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251596](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251596)

基于二维材料的极少电极单元器件微型光谱仪

王晗 陈晓龙

Miniaturized spectrometers with minimal electrode unit devices based on two-dimensional materials

WANG Han CHEN Xiaolong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050802 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251596

CSTR: 32037.14.aps.75.20251596

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251596>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维材料宽谱光电探测器研究进展

Research progress of broadband photodetectors based on two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228503 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251115>

基于二维材料光电器件的传感器内计算与应用进展

Progress in in-sensor computing and applications based on photodetectors of two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251093>

基于拓扑/二维量子材料的自旋电子器件

Spintronic devices based on topological and two-dimensional materials

物理学报. 2024, 73(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231166>

基于二维材料的集成与应用

Integration and applications of two-dimensional materials

物理学报. 2026, 75(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251386>

二维范德瓦耳斯铁电材料的研究进展

Recent progress of two-dimensional van der Waals ferroelectric materials

物理学报. 2026, 75(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251367>

金属纳米颗粒与二维材料异质结构的界面调控和物理性质

Interface modulation and physical properties of heterostructure of metal nanoparticles and two-dimensional materials

物理学报. 2022, 71(6): 066801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211902>