

专题: 二维材料与未来信息器件

等离激元增强范德瓦耳斯光电探测器 偏振性能研究进展*

菅佳玲¹⁾²⁾ 钱科宇¹⁾ 王子坚¹⁾ 苏雨辰¹⁾ 翁正进¹⁾
肖少庆¹⁾²⁾ 南海燕^{1)2)†}

1) (江南大学集成电路学院, 无锡 214122)

2) (江南大学集成电路学院, 物联网技术应用教育部工程研究中心, 无锡 214122)

(2025年8月28日收到; 2025年9月24日收到修改稿)

偏振探测是获取光矢量信息的重要手段, 广泛应用于光通信、智能感知与生物传感等领域. 二维范德瓦耳斯材料因其独特的各向异性与可调电学特性, 为实现高性能偏振探测提供了新的材料平台, 但这类材料存在本征吸收弱、响应效率有限等局限性. 等离激元结构可在微纳尺度实现强局域光场调控, 是突破上述局限性、提升探测性能的重要手段. 本文系统梳理了等离激元微纳结构与范德瓦耳斯材料的光学耦合机制, 分析了不同类型等离激元结构在各类偏振光探测中的作用与优势. 最后, 讨论了该方向在偏振敏感光通信、片上光计算与信息处理、仿真视觉与图像识别等前沿领域的应用前景, 展望了未来研究面临的机遇与挑战.

关键词: 偏振探测, 等离激元, 范德瓦耳斯材料, 表面等离激元极化, 局域表面等离激元共振**PACS:** 85.60.Gz, 42.79.Pw, 95.55.Aq, 81.07.-b**DOI:** 10.7498/aps.74.20251165**CSTR:** 32037.14.aps.74.20251165

1 引言

光的偏振作为光的物理属性之一, 包含了电磁波振动方向的矢量信息, 在诸多应用场景中承担着不可替代的作用. 在光通信领域, 偏振态可以作为信息的调制维度, 辅助实现更高密度的数据传输与解码技术^[1]; 在生物医学成像中, 偏振探测有助于区分组织结构、增强成像对比度, 从而提供丰富的组织光学特征^[2]; 而在量子光学与遥感监测中, 偏振光更成为多维编码、量子纠缠态测量或目标识别的重要载体^[3]. 然而, 目前主流的偏振光探测技术主要依赖外部偏振分光系统(如偏振滤波器、波

片、偏振、分束器等)分析不同偏振态, 此类系统不仅设备体积大, 响应速度低, 而且不适用于面向多通道、多模式实时分析的集成场景, 难以满足片上集成化和低功耗的应用需求. 因此, 开发灵敏、可调谐、可集成的偏振光探测器, 正成为光电探测器研究的关键方向.

近年来, 伴随着范德瓦耳斯(van der Waals, vdW)材料的兴起, 一系列基于二维材料的光探测器被提出并逐步进入实验验证与应用阶段^[4]. 范德瓦耳斯材料是一类由层间弱范德瓦耳斯力结合而成的层状材料, 这些材料在层内具有强的共价键或离子键, 而层间则通过较弱的范德瓦耳斯力相互作用. 代表性的二维范德瓦耳斯材料如石墨烯、黑磷

* 国家自然科学基金(批准号: 62574101)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 52203356, 62364003)、江苏省高校自然科学基金(批准号: 2011CB00000)、集成电路材料全国重点实验室2024年开放课题(批准号: SKLJC-K2024-03)和江南大学2025年度中央高校基本科研计划(青年基金项目)(批准号: JUSRP202501033)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jnanhaiyan@jiangnan.edu.cn

(black phosphorus, BP)、过渡金属硫化物 (transition metal dichalcogenides, TMDs), 因其原子层厚度、无悬挂键的界面特性以及带隙的可调性, 使其在低维光电探测中具有广泛的性能优势. 例如, 石墨烯具有超宽带响应和超快载流子迁移率, 可实现高速响应; 黑磷则因其强各向异性光学响应和本征带隙, 成为偏振敏感器件的重要候选材料; TMDs 材料则在光吸收率、激子结合能和层数依赖的光电调控方面具有多样性^[5]. 这些二维材料不仅推动了光电探测器在灵敏度、波段响应、柔性化方面的跃升, 也为偏振探测的片上集成和功能可编程提供了平台基础^[6,7]. 二维材料自身对偏振的响应虽然在某些异质结构中具有一定的方向选择性, 但其本征偏振选择性有限、响应带宽较窄, 且无法实现高方向性和主动调控. 因此, 亟需结合新的物理增强机制, 提升其偏振灵敏度、调控能力及多功能集成潜力.

在这一背景下, 等离子元增强机制因其局域光场增强、可调控谐振模式以及优异的亚波长操控能力, 被广泛引入到二维材料偏振探测器的研究中^[8]. 等离子元 (plasmonics) 是金属自由电子在电磁波驱动下发生的集体振荡, 可以通过金属-介质界面的表面等离子元 (surface plasmon polaritons, SPPs)^[9] 或金属纳米结构中局域谐振的局域表面等离子元 (localized surface plasmons resonance, LSPR)^[10] 实现光场在亚波长尺寸内的局域增强^[11]. 等离子元结构不仅能有效提升二维材料的光吸收效率, 还能通过各向异性结构提供对线偏振光或圆偏振光的选择性响应, 增强器件对偏振角度的探测灵敏度和分辨率^[12]. 此外, 等离子元结构可以通过几何尺寸、排列方式、材料类型或堆叠方式的调节谐振频率, 使结构的偏振与二维材料带隙特征相匹配, 实现偏振探测器的性能增强^[13]. 在此基础之上, 等离子元结构与二维-二维异质结器件相结合, 不仅能提升吸收率和内部电场强度, 还可通过激发极化激子、调控载流子迁移路径等方式进一步提升偏振探测器件的灵敏度、响应速度与信噪比^[14,15].

因此, 等离子元增强的 vdW 材料偏振探测器, 可以改善传统偏振探测器尺寸大、效率低的问题, 也可以实现偏振探测器从单点响应到阵列成像、从静态探测到动态调控、从线偏振识别到全参数解算的性能提升^[16]. 结合微纳光学、光神经网络与智能算法, 其应用有望拓展至光场识别、人机交互、自

动驾驶、航天与量子信息等前沿领域^[17]. 本综述将系统梳理基于 vdW 材料的偏振光探测器的最新进展, 主要内容如图 1 所示, 包括等离子元结构在偏振增强中的应用机制与集成方案, 偏振敏感光通信、片上光计算与信息处理、仿真视觉与图像识别等领域的应用潜力及面临的挑战.

2 等离子元与范德瓦耳斯材料的光学相互作用

等离子元因其能够将入射光限制于亚波长范围内并显著增强局域电磁场, 成为调控光-物质相互作用的重要手段. 当其与具有强光-电耦合特性的 vdW 材料相结合时, 不仅能突破二维材料本征吸光能力有限的瓶颈, 还可实现对其光电性能的多维度调控. 本节首先介绍等离子元的基本理论, 包括 Drude-Lorentz 模型、SPPs、LSPR 及 Mie 散射机制, 为理解其物理本质提供理论基础. 随后, 探讨局域与传播等离子元的增强效应、偏振选择性的光电调控, 以及对器件光谱响应与偏振灵敏度的影响, 阐述等离子元在提升 vdW 材料光电响应方面的作用机制, 从而为实现高性能光电器件提供理论支撑与设计依据.

2.1 等离子元基本理论

2.1.1 Drude-Lorentz 模型

Drude-Lorentz 模型在描述物质中电子行为及相关宏观性质方面具有举足轻重的地位. 1900 年, Drude^[18] 首次提出了 Drude 模型, 该模型又被称为自由电子气模型, 用于解释电子在物质 (尤其是金属) 内的输运性质. 1905 年, Hendrik Antoon Lorentz 对 Drude 模型加以拓展, 形成了 Drude-Lorentz 模型. 该模型认为电子持续在相对固定的电荷质量较大的正离子发生相对位移, 带来电子密度的重新分布, 并且考虑了电子与晶格离子相互作用. 假如, 在金属与电介质界面上可以把表面等离子元简化为自由电子沿 x 传播的一维外界电场 E 的作用下的运动 (只考虑一维方向上的电场和材料响应), 下述方程和物理量表示为^[19]

$$m \frac{dx^2}{dt^2} + m\gamma \frac{dx}{dt} = -eE, \quad (1)$$

其中, m 为自由电子质量, x 为电子位移, γ 为电子间的碰撞频率, e 为电子电量. 假设 E 为一维简谐波,

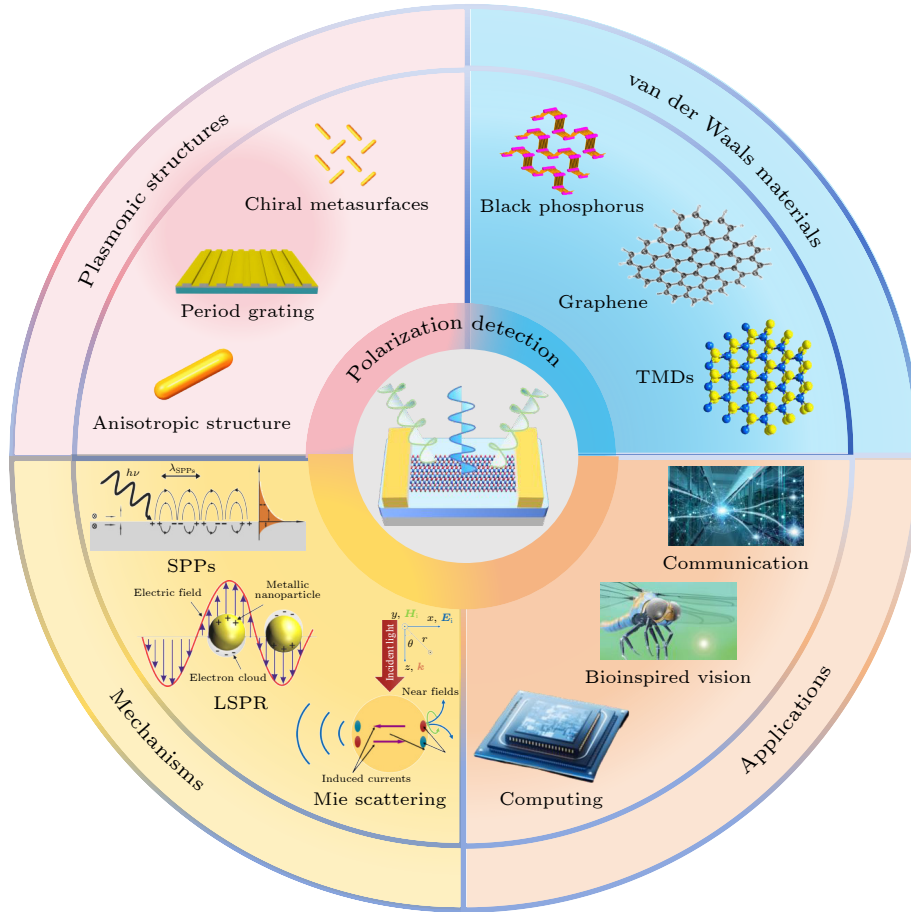


图 1 本文内容示意图, 共分为范德瓦耳斯材料、等离子元结构、等离子元的增强机制以及应用 4 个部分

Fig. 1. Schematic illustration of the main content of the article, divided into four parts: van der Waals materials, plasmonic structures, enhancement mechanisms of plasmons, and applications.

可以用 $\mathbf{E}(t) = x_0 e^{-i\omega t}$ 表示, 将其代入 (1) 式中得到电子振荡的振幅:

$$\mathbf{x}(t) = \frac{e}{m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \mathbf{E}(t), \quad (2)$$

其中, ω 为频率, 此时, 假设在金属中电子移动了一段距离 x , 带来了金属的极化, 其强度 $\mathbf{P} = -n e \mathbf{x}$, 金属中自由电子数密度为 n , 将 (2) 式代入可以得到诱导偶极矩的强度为

$$\mathbf{P} = \frac{ne^2}{m(\omega^2 + i\gamma\omega)} \mathbf{E}. \quad (3)$$

根据电位移与 \mathbf{D} 与 \mathbf{P} 的关系 $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ (其中 ϵ_0 为真空中的介电常数) 可以得到:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \right) \mathbf{E}, \quad (4)$$

式中, ω_p 称为金属的等离子元频率, γ 为材料的阻尼系数, 其中 ω_p 可表示为

$$\omega_p^2 = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m}. \quad (5)$$

ω_p 对决定 LSPR 的频率起着关键作用. 其中金属

的相对介电常数为

$$\epsilon_m(\omega) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \right) + i \frac{\gamma}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \quad (6)$$

金属的相对介电常数是一个复数, 介电常数实部与虚部分别为

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{rm}}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \\ \epsilon_{\text{im}}(\omega) = \frac{\gamma\omega_p^2}{\omega(\gamma^2 + \omega^2)}. \end{cases} \quad (7)$$

当光子频率 ω 远大于电子间的碰撞频率 γ 时, (7) 式中的 ϵ_{rm} 可近似为 $1 - \omega_p^2/\omega^2$. 在可见光与近红外波段, 对于金、银和铝等金属来说, 满足频率关系 $\omega \leq \omega_p$, 此时金属相对介电常数的实部是一个绝对值较大的负数, 虚部是一个较小的正数, 因此金、银和铝等金属可以看做理想的具有表面等离子元效应的金属. 方程 (4)–(7) 用于描述德鲁德-洛伦兹模型, 阐明入射光频率与材料介电函数之间的关系.

进一步地在光波段, 物质的光学性质由折射率来描述, 金属的折射率 n 可表示为 $n = \eta + i\kappa$, 则

η 与 κ 分别为

$$\begin{cases} \eta = \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1 \right) \right]^{1/2}, \\ \kappa = \left[\frac{1}{2} \left(\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1 \right) \right]^{1/2}. \end{cases} \quad (8)$$

当 $\gamma < \omega < \omega_p$ 时, $\eta \ll \kappa$, 传播性质主要由波矢向量的虚部主导, 在此波段内, 金属波导表面的电磁波能量随着传播距离的增大产生指数级的衰减, 这也是等离激元光波导器件光插入损耗较大的原因。

2.1.2 表面等离激元极化

SPPs 是一种沿金属-电介质界面传播的、光与金属中自由电子集体振荡耦合而产生的电磁激发现象^[20], 其电磁场随与表面的距离呈指数衰减^[21], 其物理模型如图 2(a) 所示^[22]. 图 2(b) 为 SPPs 在金属与空气 (灰色曲线) 及二氧化硅 (黑色曲线) 界面处的色散关系^[23]. SPPs 是一种在优良导体 (金属) 表面形成的二维传播电磁模式, 其电磁场沿界面传播, 并垂直界面方向呈指数衰减. 横电模 (transverse electric, TE) 和横磁模 (transverse magnetic, TM) 是不同的电磁波传播模式. TE 模是指电场矢量与电磁波传播方向垂直的模式, 在传播方向上有磁场分量但无电场分量; TM 模是指磁场矢量与电磁波传播方向垂直的模式, 在传播方向上有电场分量而无磁场分量. SPPs 主要以 TM 模式传播, 可通过求解麦克斯韦方程及边界条件获得其场分布^[16]. 由于其强束缚性和对介质环境高度敏感, SPPs 可通过减小波导横截面实现纳米尺度的模式压缩, 达到约亚波长的聚焦尺寸, 远超衍射极限^[24]. 此外, SPPs 在传播过程中可在金属-介质界面附近形成显著增强的局域电磁场, 从而提高光与物质相互作用效率, 特别在偏振光选择性探测方面具有独特优势. 这一偏振依赖性也使 SPPs 在偏振光探测器设计中具有广泛应用潜力^[25]. 通过实现周期性金属结构 (如光栅或超表面), 不仅可以有效激发 SPPs, 还可进一步调控其传播方向与共振特性. SPPs 作为一种高度可调控且与偏振特性紧密耦合的纳米光学模式, 正推动偏振光子器件、增强光电探测及结构色等方向的发展, 具有广阔的应用前景。

2.1.3 局域表面等离激元共振

局域表面等离激元共振 (localized surface plasmons resonance, LSPR) 是表面等离子体的另一种

基本激发方式. 当电磁场施加于尺寸小于入射光的金属纳米结构时, 会发生电子集体振荡, 导致近场显著增强, 并在 LSPR 频率下增强光吸收^[26], 其物理模型^[19] 如图 2(c) 所示. 图 2(d) 是 LSPR 中亚波长金属纳米粒子的相位相对于驱动场频率的分布^[23]. 当入射光子的频率与纳米颗粒表面自由电子的振动频率相匹配, 即激发光频率与具有负实部和正虚部介电常数材料中的电子振荡模式发生共振时^[27], LSPR 现象尤为显著. LSPR 频率由多个参数决定, 包括自由电子密度、有效电子质量、金属纳米粒子的尺寸、几何形状和分布^[28]. 此外, LSPR 峰值的位置和强度也受材料本征性质及周围介质介电常数的影响: 其中介电函数实部主要决定 LSPR 的消光峰位置, 而虚部则影响共振的阻尼强度与峰宽展宽^[27]. 通常可以用准静态近似来处理亚波长纳米粒子的光学响应, 由于纳米粒子空间体积的相变可以忽略不计, 因此将电磁场视为静电场. 通过求解拉普拉斯方程来推导金属颗粒内外的电势分布, 计算出颗粒的偶极矩 \mathbf{p} 表达式:

$$\mathbf{p} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_m a^3 \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon + 2\varepsilon_m} \mathbf{E}_0, \quad (9)$$

其中 $\varepsilon(\omega)$ 和 ε_m 分别是粒子的介电函数和介质的介电函数, E_0 是施加的电场强度, a 是球体的半径, 又因为偶极矩 $\mathbf{p} = \varepsilon_0\varepsilon_m\alpha\mathbf{E}_0$, 因此, 极化率 α 通过下式计算:

$$\alpha = 4\pi a^3 \frac{\varepsilon - \varepsilon_m}{\varepsilon + 2\varepsilon_m}. \quad (10)$$

当满足共振条件 $\text{Re}[\varepsilon(\omega)] = -2\varepsilon_m$ 时, 此时 α 趋近于无穷, 该条件称为 Fröhlich 条件. 在共振波长下, LSPR 的激发将导致强烈的光散射、显著的表面等离激元吸收带出现, 以及局部电磁场的大幅增强. 因此, 结合 LSPR 机制的光电探测器能够通过提高光吸收效率, 显著增大光生载流子的生成量^[29].

除此之外, LSPR 的共振频率 ω_{LSPR} 由多个参数共同决定, 具体表达式为

$$\omega_{\text{LSPR}} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m^* (\varepsilon_\infty + 2\varepsilon_m)}} - \gamma^2. \quad (11)$$

根据 (11) 式, 通过调节材料的金属中的自由电子密度、有效电子质量, 以及纳米粒子的尺寸、几何形状与分布等参数调控 LSPR 共振频率^[30], 且 LSPR 频率正比于材料中的自由电子密度. 贵金属如 Au, Ag, Cu, Al 具有高达 $\sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 的自由

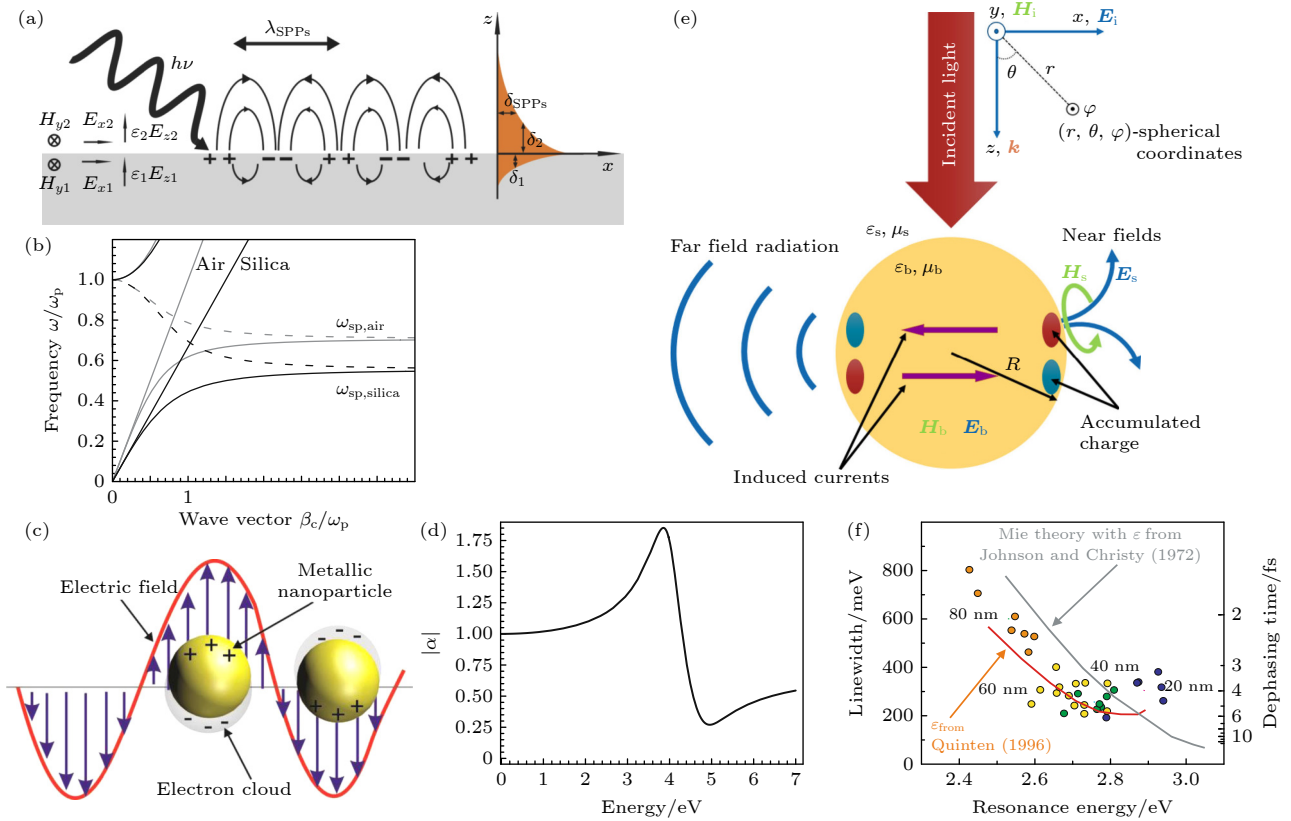


图 2 (a) SPPs 在两种介质界面处的物理模型示意图^[22]; (b) SPPs 在金属与空气 (灰色曲线) 及二氧化硅 (黑色曲线) 界面处的色散关系^[23]; (c) 纳米粒子中 LSPRs 的物理模型示意图^[19]; (d) LSPR 中亚波长金属纳米粒子的相位相对于驱动场频率的分布^[23]; (e) 在半径为 R 的球形散射体内部区域, 产生电磁辐射并形成各米氏散射的近场分布示意图^[34]; (f) 基于 Mie 散射下不同尺寸的金纳米球共振能量与等离激元共振线宽的相关关系^[23]

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the physical model of SPPs at the interface between two media^[22]; (b) dispersion relationship of SPPs at the interface between metal and air (gray curve) and silicon dioxide (black curve)^[23]; (c) schematic diagram of the physical model of LSPRs in nanoparticles^[19]; (d) phase distribution of subwavelength metal nanoparticles in LSPRs relative to the driving field frequency^[23]; (e) near-field distribution within the spherical scattering body of radius R that generates electromagnetic radiation and forms Mie scattering^[34]; (f) Correlation between Mie scattering resonance energy of gold nanospheres of different sizes and plasmon resonance linewidth^[23].

电子浓度, LSPR 共振频率通常在紫外至可见光波段. 并且当金属颗粒尺寸远小于入射光波长时, 随着尺寸增大, 电荷分离增强, LSPR 峰位向长波方向红移^[31]. 随着粒子结构对称性的降低, 其 LSPR 谱将由单峰向多峰演化^[32]. 对于尺寸较大的粒子, 准静态近似不再适用, 需要采用 Mie 散射理论进行描述.

2.1.4 Mie 散射理论

Mie 散射是由 Gustav Mie^[33] 于 1908 年在研究胶体金属溶液的光学性质时提出的经典电磁散射理论. 该理论通过求解麦克斯韦方程组, 描述了任意尺寸的均匀球形粒子对光的散射效率、吸收效率和消光效率等关键光学参数^[34]. 当入射电磁波作用于尺寸与波长相近的粒子时, 会激发出偶极、

四极甚至更高阶的多极响应模式, 统称为 Mie 模式, 这些多极模式共同决定了粒子的光学散射特性. Mie 散射的光谱特性和方向性强烈依赖于粒子的折射率、尺寸、形状以及周围介质的光学常数. 当散射粒子尺寸逐渐减小时, Mie 散射逐渐趋于瑞利散射; 而在纳米尺度下, Mie 模式可与光子或等离激元产生耦合, 进一步增强局部电磁场, 具有特定的偏振选择性和共振特性^[35]. 图 2(e) 为产生电磁辐射并形成各米氏散射的特近场分布^[34]. 基于 Mie 散射下的金纳米球等离激元共振线宽如图 2(f) 所示^[23]. 近年来, Mie 散射与纳米结构设计相结合, 已被广泛应用于光学天线、颜色调控、光电探测和偏振选择性器件的研究中, 具有优异的方向调控与偏振响应能力, 成为超表面与光子结构设计的重要理论支撑.

2.2 等离激元对范德瓦耳斯材料光电性能的增强机制

通常而言, 光电探测器探测光信号的过程包括以下 3 个步骤: (i) 入射光激发产生载流子; (ii) 光生载流子的分离; (iii) 分离载流子的输运与提取, 输出为电信号. 等离激元增强 vdW 材料光电性能主要作用于载流子的激发及分离过程中, 主要通过典型共振模式 SPP, LSPR, Mie 散射进行作用. 接下来, 本节将对上述等离激元结构如何有效提升 vdW 材料的光吸收效率、光电流响应及偏振敏感性的光电性能的作用机制展开论述.

2.2.1 传播等离激元的增强机制

SPPs 作为一种沿金属-介质界面传播的共振模式, 具有长程传播和强亚波长场限的特点, 可在二维材料大面积区域增强光-物质相互作用. 其模式可延伸至数十微米, 同时保持纳米尺度的垂直方向能量压缩, 兼具深亚波长局域能力与远程传播特性, 适合用于对二维材料或窄带宽材料的增强耦合. SPP 模式在金属/半导体界面处形成局域高强度电场可以增强入射光与 vdW 的相互作用, 从而提升光生载流子的生成率; SPP 传播特性可引导光场在面内传输, 增大了光敏材料的光收发面积, 进而增强了探测信号输出的一致性和强度. 如各种类型的长程等离激元波导, 包括金属 V 型狭缝波导^[36]、垂直金属-绝缘体-金属波导^[37]、硅基混合金属包层波导^[38]、等离激元狭缝波导^[39]和等离激元双狭缝波导^[40].

用于实现 SPP 的高效率激发与光模场局域的结构主要包括以下几种: 金属周期性光栅结构用于增强探测器件的偏振特性, Echtermeyer 等^[41]研究了一种基于金属-石墨烯结构的 SPP 增强型探测器, 利用周期金属光栅实现了 SPP 模的高效激发, 在近红外波段实现了超过 300% 的吸收增强; 金属/二维材料异质结结构, 实现了 SPP 辅助吸收并增强载流子的分离; SPP 波导结构, 通常是金属-介质-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 集成波导结构, 利用局域光场实现探测器的高响应度, 利用窄沟道提升载流子收集速度.

MIM 结构利用了长程等离激元的倏逝波特性, 通过两层金属-电介质界面产生等离激元倏逝波的耦合, 实现了对光的束缚, 可以在光频率范围内传播数十微米, 是集成光学中用来增强光与物质

相互作用的波导结构. 与传统的波导如光学频率下的介质波导及半导体狭缝波导、微波频率下的蝶形波导等相比, MIM 波导通过核心和包层之间的折射率差异引导光. Ma 等^[42]将金属 MIM 结构沉积在石墨烯上, 利用等离激元光场局域特性增强了硅介质波导上石墨烯对光的吸收, 提高了该探测器光电转换的效率. 该探测器在 1.55 μm 入射光波长下的响应度为 0.085 A/W, 但是这种不连续的结构带来的光吸收增强有限. 在此基础上, 将 15 nm 宽的等离激元狭缝波导完全沉积在石墨烯上^[43], 与普通的石墨烯波导光电探测器相比, 单位长度下器件的响应率提升了 30 倍, 在波长为 1.55 μm 时该类型探测器的响应率为 0.67 A/W. 为了进一步提升该类探测器的响应度与带宽, 由 Au/Pd 和 Au/Ti 两个不对称的金属接触组成等离激元狭缝波导^[44], 电位差导致了光生载流子的有效分离和光电流的形成. 这样的差异提升了载流子的收集效率. 该新型等离激元增强石墨光电探测器在 1.55 μm 下工作时响应度为 0.5 A/W, 数据传输速率为 100 Gbit/s, 该光电探测器性能在响应度和响应速度的提升, 充分展现了等离激元狭缝波导对探测器性能提升的作用.

2.2.2 局域等离激元 LSPR 的增强机制

等离激元结构在共振频率下具有良好的光场限制能力, 从而更有效地吸收入射光并激发更多的本征电子-空穴对. LSPR 对光探测器性能的提升主要通过两种机制实现: 近场增强以及等离激元诱导的热电子注入. 本节将对 LSPR 光电探测器中上述两种增强机制进行论述.

当金属纳米结构被共振频率的光激发时, 表面自由电子发生集体振荡, 形成 LSPR. 该振荡在亚波长尺度内产生极强电磁场, 称为近场增强. 其强度可比入射场高 2—3 个数量级, 显著提升邻近吸收层的光吸收效率. 近场增强的电场分布与金属的结构参数相关, 主要包括结构几何形状、纳米结构间的间距以及载流子浓度等. 通常在实验上使用光子诱导近场电子能谱 (photon-induced near-field electron microscopy, PINEM) 和在理论分析上使用时域有限差分法 (finite different time domain, FDTD) 对等离激元纳米结构周围电场分布进行分析. 利用 FDTD 方法对不同形状的纳米颗粒的电场分布进行模拟仿真, 图 3 分别展示了纳米球^[45]、

纳米核壳结构^[46]、纳米棒^[47]、纳米三角^[48]等结构的电场分布,可以看出, LSPR 特性几何形貌对金属纳米颗粒 LSPR 特性具有关键调控作用,主要调控包括粒子结构由对称向非对称演化可引入多阶共振模式,从而使 LSPR 光谱由单峰拓展为多峰.特别地,金属纳米棒在长轴与短轴方向分别具有纵模与横模 LSPR 模式,其峰位与粒子纵横比密切相关.此外,带有尖锐边角的结构如纳米三角形与立

方体,在 LSPR 响应中具有更丰富的模态与局域增强效应. Dravid 等^[49]研究了基于 Au@MoS₂ 核壳异质结构的 LSPR 增强光电晶体管,如图 4(a)所示.该结构利用金属核产生的等离激元共振诱发局域电场增强,并通过光散射增大光程,提升包覆的 MoS₂ 层对光的吸收,如图 4(b)所示,图中的箭头 3 为光激发的路径;同时还可能通过等离激元诱导界面电荷转移等非平衡过程促进载流子分离和

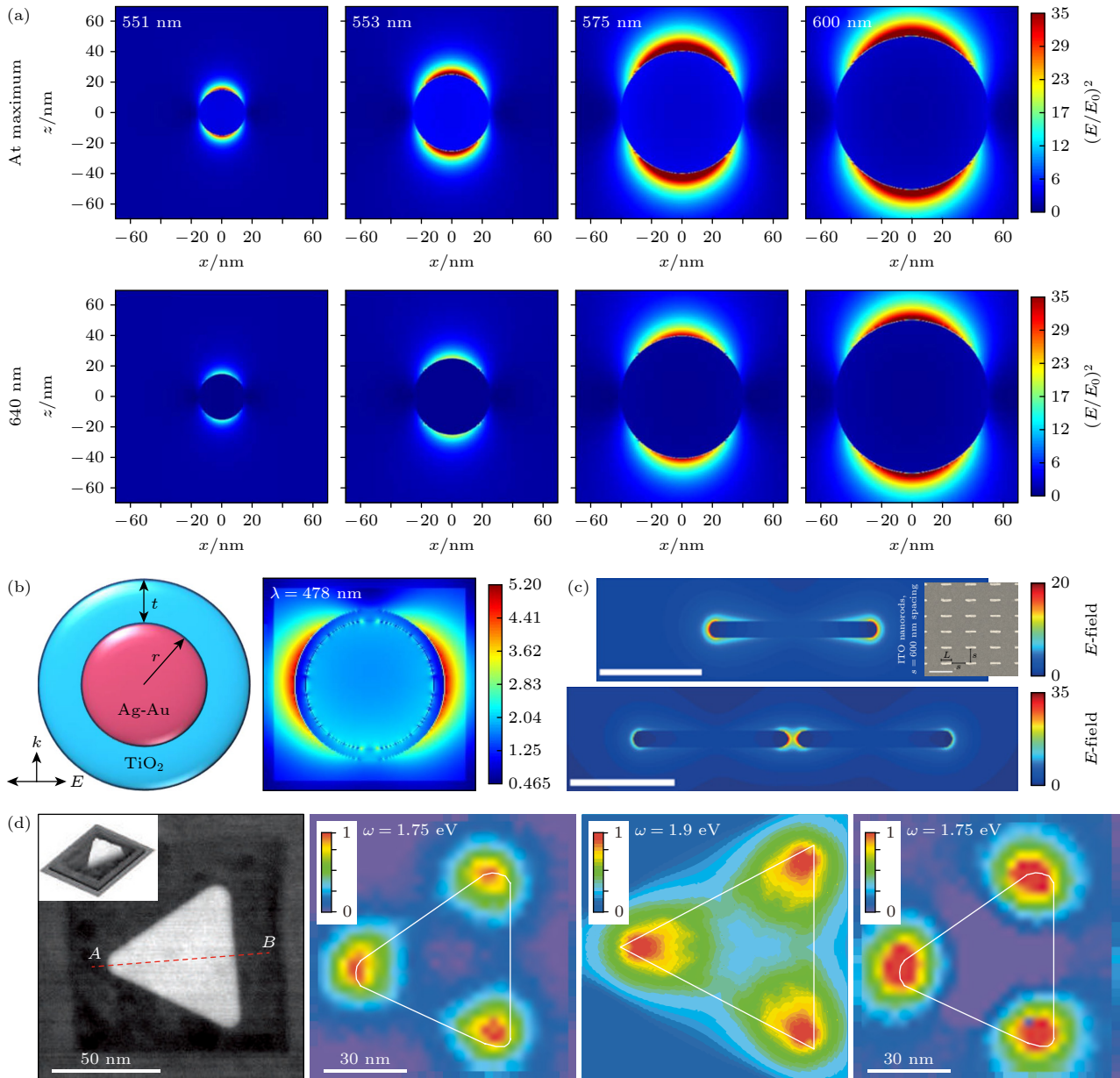


图 3 不同形状纳米颗粒的 FDTD 电场分布模拟仿真 (a) 直径为 30, 50, 80 和 100 nm 纳米球的电场分布^[45]; (b) 核壳结构的电场分布^[46]; (c) 微米 ITO 纳米棒天线与微米 ITO 二聚体天线的电场分布^[47]; (d) 三角粒子光谱中分别以 1.75, 2.70 和 3.20 eV 为中心的电场分布^[48]

Fig. 3. FDTD electric field distribution simulation of nanoparticles with different shapes: (a) Electric field distribution of spheres with diameters of 30, 50, 80, and 100 nm^[45]; (b) electric field distribution of core-shell structure^[46]; (c) electric field diagrams of micro-ITO nanorods and micro-ITO dimers antennas^[47]; (d) electric field distribution centered at 1.75, 2.70, and 3.20 eV in the triangular particle spectrum^[48].

迁移. 如图 4(c) 所示, 器件测试结果表明, 该结构光响应度是普通 MoS₂ 晶体管的 10 倍, Si 支撑的无栅结构响应度高达 22.3 A/W, 且具备更快的响应速度, 体现出 LSPR 在 vdW 器件中的高增益潜力. 此外, Alamri 等^[50] 研究了 WS₂ 纳米圆盘/石墨烯异质结光电探测器, 如图 4(d) 所示, 利用 WS₂ 纳米圆盘 (200—400 nm) 激发 LSPR 增强局部光吸收, 使得该结构在 550 nm 处的光响应度达到 6.4 A/W, 约为连续 WS₂ 层结构 (0.91 A/W) 的

7 倍; 在极低光照强度 (3 μW/cm²) 下仍实现了高达 8.05 A/W 的响应度与 2.8×10¹⁰ Jones 的探测率, 表明了 LSPR 对 vdW 光吸收效率的放大效果. 如图 4(e) 所示, 实验表明, 该结构相较于 WS₂ 连续膜器件, 在 400—800 nm 范围内均具有更高响应度, 并在 500—550 nm 处呈现宽带响应峰, 显示出 LSPR 在中短波段调控潜力. 这类各向异性的 LSPR 结构可对不同偏振方向的入射光具有差异化响应, 进而实现偏振调控.

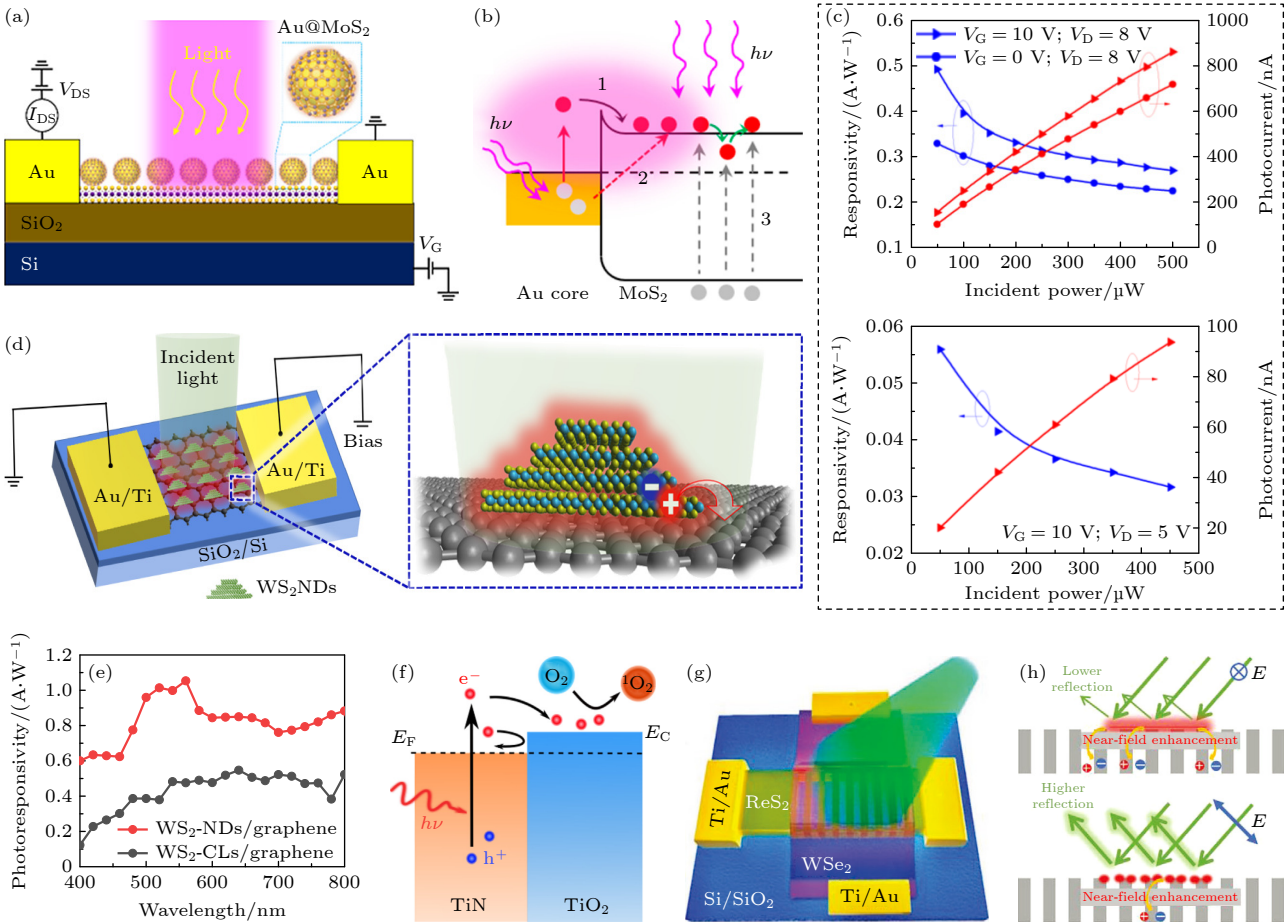


图 4 (a) 基于 Au@MoS₂ 核壳异质结构的 LSPR 增强光电晶体管器件结构示意图^[49]; (b) Au@MoS₂ 异质结构中可能的光生载流子生成路径^[49]; (c) Au@MoS₂ 光电晶体管上光电流和响应度随入射功率的变化, 以及多层 MoS₂ 光电晶体管上光电流和响应度随入射功率的变化^[49]; (d) 基于 WS₂ 纳米盘/石墨烯范德瓦耳斯异质结构的光电探测器示意图以及 WS₂ 纳米盘/石墨烯光电探测器的放大视图, 图中展示了在范德瓦耳斯界面处的电荷转移过程^[50]; (e) WS₂ 纳米盘/石墨烯光电探测器 (红色) 和 WS₂ 连续膜/石墨烯光电探测器 (黑色) 的光谱光响应性^[50]; (f) 热电子的生成和转移过程^[54]; (g) WSe₂/ReS₂ 异质结构的示意图^[59]; (h) 水平与垂直偏振下等离激元共振与光生载流子分离的相关示意图^[59]

Fig. 4. (a) Schematic showing the Au core–multilayer MoS₂ shell structure^[49]; (b) the possible photocarrier generation paths in the Au@MoS₂ heterostructure^[49]; (c) the variation of photocurrent and responsivity on the Au@MoS₂ phototransistor with incident power, as well as the variation of photocurrent and responsivity on the multilayer MoS₂ phototransistor with incident power^[49]; (d) schematic diagram of a WS₂ nanodisk/graphene van der Waals heterostructure photodetector and an enlarged view of the WS₂ nanodisk/graphene photodetector, showing the charge transfer process at the van der Waals interface^[50]; (e) spectral light responsivity of the WS₂ nanodisk/graphene photodetector (red) and the WS₂ continuous film/graphene photodetector (black)^[50]; (f) generation and transfer process of hot electrons^[54]; (g) schematic diagram of the heterostructure WSe₂/ReS₂^[59]; (h) optical resonance phenomenon under horizontal and vertical polarization and its contribution to electron-hole generation^[59].

当 LSPR 结构与各向异性的二维材料 (如 BP, ReS₂, In₂Se₃ 等) 集成时, 近场增强可以在增强光-物质相互作用的同时, 实现对偏振态的方向选择性响应与调制, 为实现高灵敏、片上集成的偏振探测器提供了可行路径.

除近场增强效应外, 等离子体诱导的热电子注入机制是 LSPR 提升光电探测器性能的关键路径之一, 尤其在增强弱光条件下的偏振探测灵敏度等方面表现出独特优势. 当 LSPR 发生非辐射衰减时, 局部共振能量转化为高能电子 (热电子). 若其能量高于金属-半导体界面肖特基势垒, 则可注入半导体导带, 产生的热电子有可能跨越肖特基势垒注入到吸收层中产生光响应. 该机制甚至能够在入射光能量低于半导体带隙时的“亚带隙光响应”, 对红外偏振成像、低功耗偏振识别等应用具有重要意义 [51].

在金属纳米结构中, LSPR 激发后可通过辐射衰减 (再发射光子) 或非辐射衰减 (Landau 阻尼) 耗散能量, 其中后者会产生具有高动能的“热电子”和“热空穴”. 当热电子动能足以克服金属-半导体界面的势垒 (如肖特基势垒 ϕ_B), 便可注入至半导体吸收层形成附加光电流, 从而在低能长波条件下显著提升器件响应 [52]. 该过程通常包括 4 个阶段: LSPR 激发、非辐射衰减产生热电子、超快载流子弛豫 (100 fs—1 ps) 以及界面注入. 由于注入需同时满足能量与动量匹配, 仅有一部分热电子可有效注入, 导致整体效率有限, 仍是当前提升器件性能的研究重点 [53].

为提高该机制的效率, 研究者从材料、界面及结构设计等方面展开了大量探索. 例如, 贵金属 Au, Ag 因自由电子散射率低而广泛用于 LSPR 结构, 但其本征损耗及调控能力有限. 近年来, TiN 等新型等离子体材料受到关注, 其具有更高的热电子生成率及更长的平均自由程. 在 TiN/TiO₂ 核壳结构中, 模拟结果显示其具备优异的热电子注入效率 [54], 其能带图如图 4(f) 所示, 在脉冲辐照下, 当波长与 TiN@TiO₂ NPs 的等离子体共振重叠时, 产生表面等离子体, 然后非辐射衰变成热电子/空穴对. 在结构方面, 实现具有能带调控能力的异质结结构 (如 Cu₂xSe-CdSe p-n 异质结) 可有效延长热电子寿命 (约 130 ps), 相较传统金属-半导体体系提高了两个数量级 [55]. 这对提升偏振探测器在响应持续性与方向选择性方面具有重要意义. 在具有结构

各向异性的等离子体纳米结构中, 不同偏振态的光可激发方向选择性的局域共振模式, 从而实现热电子注入过程的偏振调控, 具有在偏振分辨探测与响应增强方面的应用潜力. 相较于依赖局域电场增强的近场增强机制, 热电子注入过程侧重于等离子体非辐射衰减后能量向载流子通道的转化与输运, 两者在增强光与物质相互作用的物理路径上具有显著差异; 前者主要提升吸收截面与激发效率, 后者则赋予器件亚带隙响应与偏振选择性电荷注入能力. 二者协同作用, 有望在低维偏振探测器件中实现高增益、宽光谱、高灵敏度等综合性能的优化.

Liu 等 [56] 研究了一种基于 WSe₂ 肖特基光探测器 MoS₂ 场效应晶体管集成的宽谱偏振探测系统, 其偏振灵敏性来源于金属电极的 LSPR 诱导热电子注入而非材料本征各向异性. 入射偏振光在电极边缘激发的 LSPR 产生与偏振方向相关的局域电场, 非辐射衰减产生的热电子在皮秒尺度内跨越金属/WSe₂ 肖特基势垒注入沟道, 从而在近红外波段实现显著的偏振依赖光响应. 集成 MoS₂ 放大单元后, 各向异性比由约 2 提升至 60, 近红外区开关比达 4.4×10^3 , 可见区达 5.7×10^5 , 满足实际应用需求. Yu 等 [57] 研究了利用 Al 掺杂氧化锌 (aluminum-doped zinc oxide, AZO) 纳米结构在中红外区的 LSPR 产生强局域电场, 非辐射衰减生成的高能电子可在皮秒尺度内跨越 AZO/石墨烯界面的势垒注入石墨烯沟道, 与石墨烯超高载流子迁移率与宽带吸收特性结合, 注入电子能够被快速收集, 从而实现极高的光电响应: 在室温下, 器件在 3—5 μm 波段的光响应度高达 4712 A/W, 比探测率 (specific detectivity, D^*) 达到 1.4×10^{11} Jones, 在同类二维材料中红外探测器中处于领先水平.

2.2.3 Mie 散射的增强机制

除了常见的 LSPR 增强机制外, Mie 散射效应在偏振调控型光电探测器中的作用同样具有重要价值. Mie 散射理论适用于描述尺寸与入射波长相当的金属纳米结构, 其散射响应中包含了高阶多极模态 (如偶极、四极、六极等), 可在不同偏振方向下激发具有方向选择性的电场分布, 通过调控金属纳米结构的几何形貌及其排列方式, 可有效控制局域“hot spot”位置与强度. 特别是对于几何形貌具有各向异性的纳米结构 (如纳米棒、纳米椭球、三角形纳米盘、双锥等), 其不同轴向上的谐振频率对

入射光偏振极为敏感,能够显著提升在特定偏振方向下的近场增强效果.通过合理设计结构参数(如长宽比、尖端曲率、排列周期等),可在二维光敏材料(如 MoS₂, BP 等)表面实现明显的偏振响应差异,从而提升偏振消光比和光电转换效率.

Chen 等^[58]研究了各向异性金属纳米结构阵列显著增强了 MoS₂ 器件的偏振光响应,最大偏振光电流响应比超过 200%,显示了 Mie 散射增强机制在实际器件中的优越性能. Yan 等^[59]合作研究了一种 TMDs 纳米狭缝嵌入式光电探测器,如图 4(g) 所示.该结构利用 ReS₂ 材料本征的面内各向异性与狭缝诱导的几何各向异性协同,激发强烈的各向异性米氏共振,在 532 nm 波长下产生显著吸收增强.如图 4(h) 所示,其偏振响应与纳米狭缝方向密切相关,当狭缝方向与 ReS₂ 的晶格 *b* 轴以及光偏振方向对齐时,可激发最强共振模式,器件的各向异性比高达 12.6.该工作强调了狭缝方向与深度在优化偏振灵敏度方面的关键作用,为开发新型偏振灵敏光探测器提供了可行方案.

除此之外,研究人员们会通过设计具有几何非对称性的多层异质结构(如金属/介电体/二维材料),实现 Mie 散射模与 LSPR 模之间的有效耦合.为进一步突破传统 Mie 散射器件在光场调控能力方面的局限. Li 等^[60]研究了一种基于多层 WS₂ 纳米天线与 Au 耦合的混合型纳米天线系统,实现了高 *Q* 因子的 Mie-LSPR 结构.该结构中的 WS₂ 纳米天线通过其高折射率引导 Mie 模激发,同时与 Au 基底形成 Fabry-Perot 干涉腔模与 SPP 表面等离子激元模耦合,形成三模叠加增强体系.在实验中,MP 模的品质因子最高提升至传统 Mie 模的 33 倍以上,并在调控结构参数后进一步激发出类束缚态,实现高达 260 的实验 *Q* 因子,光提取增强超过 10⁷ 倍,并实现了最高 50% 的辐射方向性,为二维材料实现高 *Q*, 强局域场的纳米光电器件提供了新路径.

综上所述, SPP 模式更适用于实现片上长距离光能耦合、大面积吸收增强与可调谐宽谱响应,而 LSPR 结构则因其强局域场特性,尤其适配于二维材料的光场增强,适用于实现灵敏度高、器件尺寸小的偏振探测器.通过合理设计金属纳米结构的几何参数(如形状、尺寸及排列方式),可有效调控其对不同偏振态光的耦合效率,显著提升偏振探测灵敏度,是实现高性能偏振光电探测器的关键策略

之一.进一步与范德瓦耳斯材料异质结构耦合,有望实现光谱响应的可调控性与偏振选择性的协同增强,为发展新型集成化偏振探测器提供重要支撑.

3 等离子激元结构在范德瓦耳斯材料偏振光探测器中的应用

等离子激元结构通过增强局域光场和引入结构各向异性,为提升 vdW 材料光电探测器的偏振响应性能提供了多样化设计路径.本节围绕三类典型等离子激元结构的设计与应用展开讨论,系统梳理其在偏振选择性增强中的作用机制与应用实例. LSPR 和 SPP 结构与 vdW 材料(如石墨烯、MoS₂、WSe₂、BP 等)相结合,可以显著提高光探测器的性能,主要体现在以下几个方面.

3.1 各向异性纳米结构提升偏振选择性

各向异性等离子激元结构通过在几何形貌上引入方向不对称性,可在特定偏振方向上显著增强局域电场,进而提升光与材料相互作用的偏振选择性.与 vdW 材料耦合时,这类结构可利用定向 LSPR 模式对特定偏振光进行选择增强,从而提高器件的偏振对比度与灵敏度.典型的几何各向异性金属纳米结构包括金纳米棒、蝶型天线、金属光栅^[61]等,它们在长轴方向对线偏振光具有更强的共振响应.例如,金纳米棒阵列在长轴方向与入射光偏振对齐时,其 LSPR 模式显著增强该方向吸收^[62],从而提高光电探测响应.苏州大学 Cao 等^[63]研究了将 BP 晶体取向与银纳米线排布方向联合设计,形成 BP/Ag 纳米线偏振探测器,如图 5(a) 所示.在 TM 偏振下,银纳米线 LSPR 将光场强烈局域于 BP/Ag 界面并通过登伯效应产生高光电流,而 TE 偏振仅激发泄漏模共振,响应显著减弱.该器件在 ZZ 构型下实现了 118.4 的偏振比、802.42 A/W 的响应度和 636 ps 的超快响应时间,并应用于无密钥光通信偏振调控.利用各向异性电场分布调控 vdW 材料的不同振动模式也是一种有效途径. Lu 等^[64]研究了银纳米立方体-镜面腔体结构,通过单层 MoS₂ 将纳米立方体与超光滑银膜隔开形成约 1 nm 间隙,如图 5(b) 所示.该结构激发的磁偶极模式在垂直方向产生电场增强高达 934,显著增强了 MoS₂ 的 A_{1g} 模式拉曼信号,而水平方向场强仅为 50 倍,体现出优异的偏振选择性.同时这类结构还可以在本征各向异性材料的基础上进一

步放大偏振效应, Venuthurumilli 等^[65]研究了利用两种不同的蝶型等离激元结构以提升基于 BP 的偏振探测性能, 如图 5(c) 所示. 通过两种不同的蝶型等离激元结构增强 BP 的偏振响应, 其中蝶型孔径在 1550 nm 下选择性增强 Armchair 方向吸收并抑制 Zigzag 方向, 如图 5(d) 所示, 偏振比达 8.7. 再者, 可以调控结构的长轴-短轴比例改变 LSPR 的方向性. 2025 年, Li 等^[66]利用溶剂辅助软光刻制备低对称性纳米纺锤体阵列, 实现厘米级有序排列与方向控制. 如图 5(e) 所示, FDTD 模拟表明, 该结构在长轴方向的 LSPR 响应强于短轴方向 33 倍, 且透射光谱随偏振角从 0° 旋转至 90° 由绿色变为红色, 仅 TM 偏振可激发纵向共振. 典型如金纳米棒, 其长轴方向决定了纵向与横向等离激元模式的位置, 长径比调控使其共振波长覆盖从可见到近红外波段^[67]. 将金纳米棒修饰于 MoS₂ 表面后, 器件响应度从 2.4×10^{-3} A/W 显著提升至 0.484 A/W, 响应时间缩短至 20 ms, 且光谱响应范围有效扩展至近红外波段. 此外, Chu 等^[68]研究了 MoS₂ 光栅- In₂Se₃ 异质结结构, 通过引入导模共振 (790 nm) 与表面等离激元共振 (960 nm), 实现了对近红外波段的多重光谱增强, 器件响应度

达 28.5 A/W, 探测率高达 9.81×10^{12} Jones. 除吸收增强外, 各向异性结构还可调控发射方向性与发射偏振. Wen 等^[69]研究了角堆叠 Au 纳米棒手性天线, 如图 5(f) 所示, 将单层 MoS₂ 置于 5 nm 纳米间隙中, 实现室温谷极化度 47%、光致发光 (photoluminescence, PL) 强度提升 3 个数量级, 并在 640—800 nm 范围实现定向甚至单向发射调控.

综上, 各向异性等离激元结构通过形貌调控与本征各向异性材料协同耦合, 可实现偏振方向上的光场局域增强, 从而显著提升 vdW 材料光电探测器的偏振响应性能. 这类设计方法具有可调性强、可集成度高的优势, 为未来高灵敏、高选择性偏振光探测器的开发提供了重要思路.

3.2 周期性等离激元光栅增强 TM/TE 模式选择性

在 vdW 材料偏振光探测器中, 周期性等离激元光栅能够通过入射光偏振状态的模式选择性增强, 显著提升器件的偏振灵敏度与光谱响应性能. 其核心机制是利用亚波长周期的金属/介质结构与入射光波矢的动量匹配, 激发 SPPs 或 LSPRs, 在特定偏振模式下产生强共振增强效应.

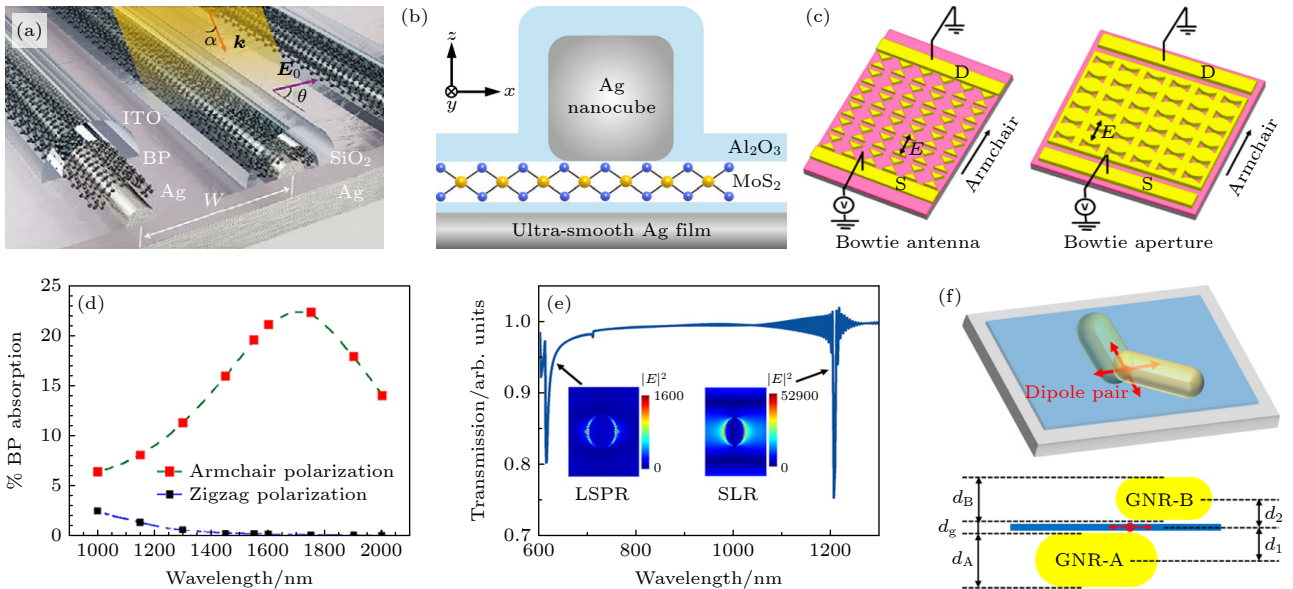


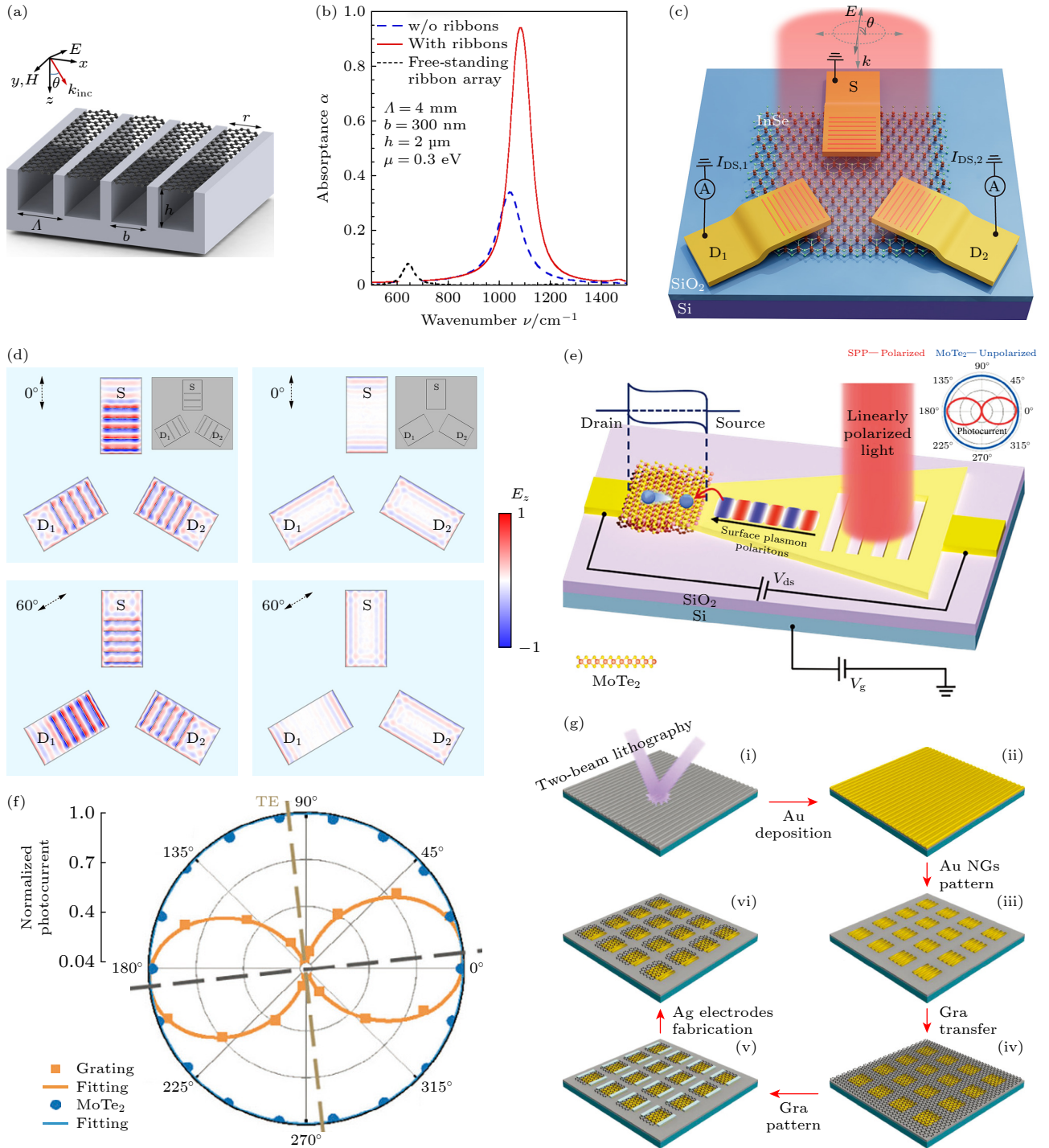
图 5 (a) BP 光子器件的结构示意图^[63]; (b) 1L-MoS₂-NCOM 示意图^[64]; (c) 两种设计的 BP 等离子体结构^[65]; (d) 两种不同偏振 (扶手椅型和之字形) 下的吸收谱^[63]; (e) LSPR 和 SLR 模式在整个单元格中的电场强度 $|E|^2$ 的模拟大小^[66]; (f) 基于金属天线改进的远场定向辐射计算方案示意图, 黄色为 GNR 材料, 蓝色为 MoS₂ 单层膜^[69]

Fig. 5. (a) Schematic structure of BP photonic device^[63]; (b) schematic diagram of 1L-MoS₂-NCOM^[64]; (c) two designs of BP plasma structures^[65]; (d) absorption spectra under two different polarizations (armchair and zigzag)^[63]; (e) simulated size of electric field strength $|E|^2$ in LSPR and SLR modes throughout the entire cell^[66]; (f) schematic diagram of far-field directional radiation calculation scheme based on antenna improvement, yellow represents GNR material, blue represents monolayer MoS₂ film^[69].

光栅 TM 与 TE 模式的选择性源于其固有的电磁响应差异: TM 模式的电场分量垂直于金属条纹方向, 能够在金属-介质界面有效激发 SPPs, 在界面附近形成强局域电场以增强吸收与载流子激发; 而 TE 模式的电场平行于金属条纹, 难以激发等离激元模式, 从而抑制吸收^[70]. 通过调节光栅的周期、线宽、厚度及材料参数, 可有效优化偏振的选择特性^[68]. 早期的典型工作如 Zhao 和 Zhang^[71]

研究了石墨烯 ribbon 阵列与周期性金属光栅组成的混合等离激元系统中 SPP 的增强效应, 如图 6(a) 所示. 单独的纳米金属棒阵列吸收率仅为 0.35, 而引入金属光栅后吸收率提升至 0.94, 如图 6(b) 所示, 这归因于金属中的磁极化子与石墨烯等离激元的强耦合.

Wang 等^[72] 研究了一种旋转对称等离激元光栅电极结构, 将三重旋转对称的 620 nm 周期、



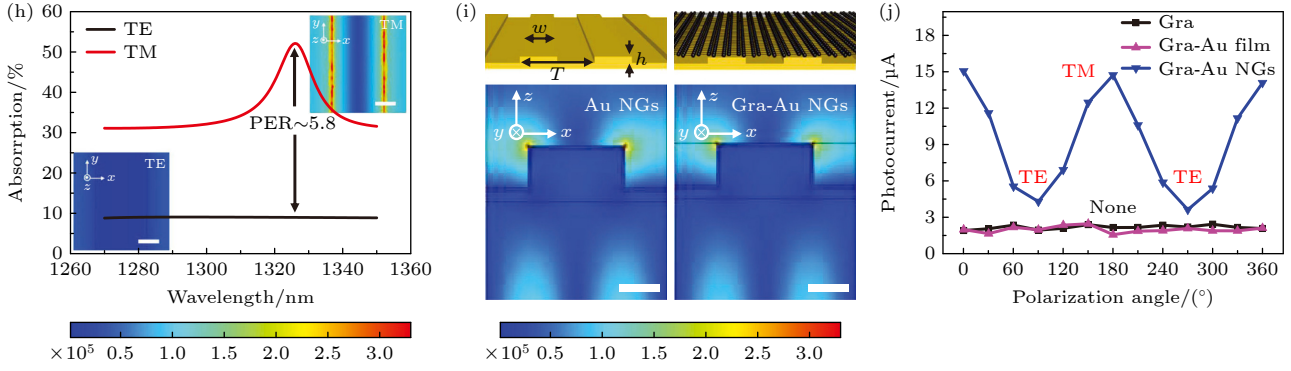


图 6 (a) 平面波入射下混合光栅-石墨烯结构示意图^[71]; (b) 纯银光栅、独立石墨烯及覆盖石墨烯的光栅 ($r = b$) 的法向吸收光谱对比^[71]; (c) 全线性偏振光探测器示意图^[72]; (d) 旋转变焦透镜接触的场分布, 在 0° 和 60° 偏振光照射下, 具有光栅结构的接触点的电场分布, 以及没有光栅结构的接触点的电场分布^[72]; (e) 通过片上 SPP 介质波导的 MoTe_2 基光电探测器^[73]; (f) 归一化光电流作为入射偏振方向的函数, 橙色方块表示光栅上的入射, 蓝色圆圈表示 MoTe_2 上的入射^[73]; (g) 制备流程示意图^[61]; (h) 石墨烯-Au 纳米光栅在 TE 偏振和 TM 偏振光照射下的模拟吸收光谱^[61]; (i) 在 1327 nm 的波长下, 未偏振光在 Au NGs 和 Gra-Au NGs 上的电场分布^[61]; (j) 器件光电流对偏振角的依赖性^[61]

Fig. 6. (a) Schematic diagram of mixed grating-graphene structure under plane wave incidence^[71]; (b) comparison of normal absorption spectra for pure silver gratings, independent graphene, and gratings covered with graphene ($r = b$)^[71]; (c) schematic diagram of the fully linear polarization light detector^[72]; (d) near-field distribution when the focal plane lens is in contact. The electric field distribution at the contact point with and without grating structure under illumination of 0° and 60° polarized light^[72]; (e) MoTe_2 -based photodetector mediated by on-chip SPP^[73]; (f) normalized photocurrent as a function of the incident polarization direction, the orange squares represent the incidence on the grating, and the blue circles represent the incidence on MoTe_2 ^[73]; (g) schematic diagram of the preparation process^[61]; (h) simulated absorption spectra of Graphene-Au nanogratings under TE and TM polarization light illumination^[61]; (i) electric field distribution of unpolarized light on Au NGs and Gra-Au NGs at a wavelength of 1327 nm ^[61]; (j) dependence of the device photocurrent on the polarization angle^[61].

40 nm 线宽光栅电极与二维 In_2Se_3 薄膜集成, 如图 6(c) 所示. 如图 6(d) 所示, 当入射光偏振方向与任一电极条纹垂直时, 满足 SPPs 激发条件, 在对应电极表面产生强局域电场; 而当平行于电极条纹时强效应消失. 该设计实现了不同偏振方向下电流方向与幅值的差异性, 通过两组源漏电流 (IDS, 1 与 IDS, 2) 的测量可解算线偏振角, 且可在零偏压下完成全向偏振探测. Li 等^[73] 则研究了利用金光栅超表面与 MoTe_2 实现近红外 (900—1200 nm) 偏振探测器, 通过等离激元激发与肖特基势垒电调谐实现动态响应, 如图 6(e) 所示. TM 偏振下, SPPs 沿光栅传播至 MoTe_2 接触区, 局域场增强使能量传输效率高达 56%; TE 偏振下几乎无吸收增强. 电控调节可进一步改变势垒高度, 实现偏振灵敏度调控. 实验中, 带光栅器件在 TM 模式下偏振度为 0.9, 而无光栅时降为 0, 如图 6(f) 所示, 表明光栅是偏振增强的核心单元.

在大面积、低成本制备方面, Fan 等^[61] 研究了基于晶圆级金光栅与单层石墨烯异质结构的光探测器, 如图 6(g) 所示. 双束全息光刻制备的光栅周期约 900 nm, 高度 220 nm, 其在 1327 nm 共振

波长下对 TM 偏振的吸收强度为 TE 的 5.8 倍, 见图 6(h). TM 模式下器件响应度达 2.95 mA/W , 而 TE 模式仅为 0.44 mA/W , 偏振消光比为 6.65. 如图 6(i)—(j) 所示, FDTD 模拟表明, 仅在 TM 偏振下光栅边缘形成强局域场, 进一步证实了光栅在偏振选择性增强中的关键作用.

综上, 周期性等离激元光栅通过对 TM/TE 模式的差异化耦合, 实现了 vdW 材料偏振探测器在灵敏度、光谱响应和功能集成方面的显著提升. 其可调性与可扩展性为片上偏振控制器件在高性能成像、光通信和量子信息等领域的應用提供了坚实基础.

3.3 手性等离激元结构增强 vdW 材料圆偏振探测性能

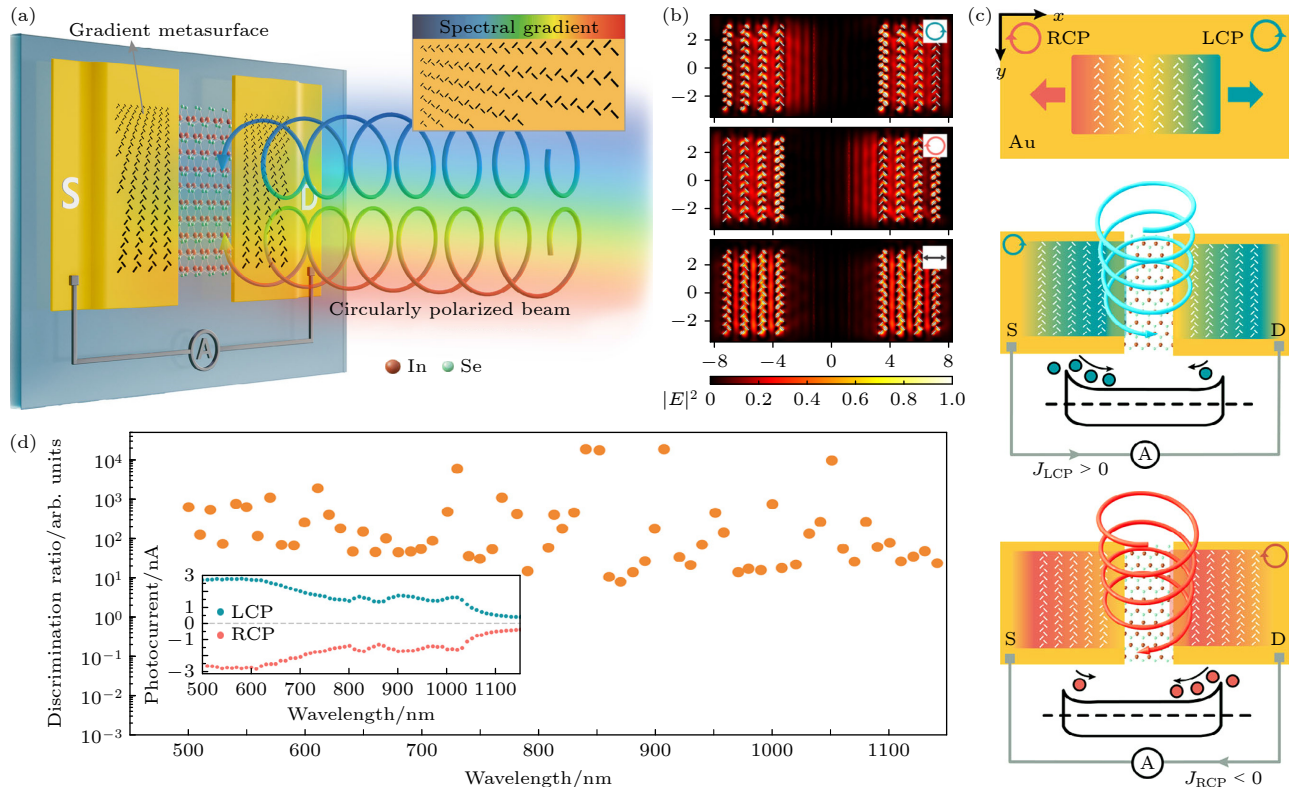
在 vdW 材料偏振光探测器中, 手性等离激元结构通过引入几何手性或材料本征手性^[74], 实现了对圆偏振光 (circular polarizer luminescence, CPL) 的高效响应与调控. CPL 探测在量子光学、生物医学成像及新一代光通信^[75] 等领域具有重要应用价值. 然而, 传统紧凑型 CPL 探测器普遍存

在灵敏度低、工作带宽窄以及对非 CP 光干扰敏感等问题。

为突破性能瓶颈, He 等^[76]研究了梯度手性超表面接触探测器. 将三重对称人工超表面与二维 In_2Se_3 集成, 如图 7(a) 所示. 该超表面由垂直交叉的纳米狭缝阵列组成, 狭缝尺寸与梯度分布经过优化, 可实现对左旋圆偏振光 (left circular polarization, LCP) 与右旋圆偏振光 (right circular polarization, RCP) 的差异化耦合. 入射 LCP/RCP 光激发单向传播的 SPPs, 并分别增强左/右电极处的局域电场, 如图 7(b) 所示; 在 In_2Se_3 -金属电极的肖特基结中, 场分布不对称性导致光生载流子矢量分离, 产生方向相反的光电流, 实现 CPL 旋向区分, 如图 7(c) 所示. 该设计对线偏振光无响应, 确保了 CPL 探测纯度. 在 633 nm 波长下, 器件圆偏振鉴别率高, 约为 1.6×10^4 , 如图 7(d) 所示, 且通过调节结构参数 P 与 M 可在 500—1100 nm 实现宽带、高对比的 CPL 响应, 如图 7(e) 所示. Wei 等^[77]研究了利用金属纳米天线的几何取向调控, 实现了石墨烯偏振探测器从单极到双极响应的可编程转换, 如图 7(f) 所示. 取向角为 θ_1, θ_2 的锥形纳米天线对集成在石墨烯晶体管管上, 依靠界面热载流子效应, 在零偏压下产生局域光电流. 天线取向直接

决定了器件对线性及圆偏振光的响应方向与强度, 如图 7(g), (h) 所示, 为可调谐 CPL 探测提供了潜在路径. Lee 等^[12]研究了一种将胆甾相液晶网络手性层与 $\text{MoTe}_2/\text{MoS}_2$ 异质结相结合的 CPL 探测器, 用于偏振敏感的传感器内计算. CLCN 层凭借手性选择反射特性, 可在 300—1100 nm 波长范围区分 LCP 与 RCP, 其 R 型和 S 型结构的不对称因子分别达 1.89 和 -1.88; 半垂直结构的 vdW 异质结则实现高效光生载流子分离, 使探测器光响应速度快至 4 μs , 线性动态范围最高 114.1 dB, 且在光伏模式下光电流线性度参数接近 1, 无复杂载流子俘获/复合过程. 无需重构电路, 该器件仅凭圆偏振态调控即可模糊/锐化/边缘检测多模态混合成像, 在单电路中实现 Sobel 算子的 0° — 90° 连续切换.

除了对线偏振光的响应增强, 等离子激元结构还可实现对 CPL 的选择性调控, 特别适用于 Valley 与量子光学等前沿领域. Yang 等^[78]研究了 WSe_2 单层中的中性量子发射器与手性等离子体纳米腔的耦合行为, 如图 7(i) 所示. C_3 对称性的手性金纳米棒晶格通过手性等离子激元共振显著增强局部光学手性 (8—14 倍), 调控 QEs 的发光偏振属性, 使输出偏振由纳米腔主导而非传统谷选择规则,



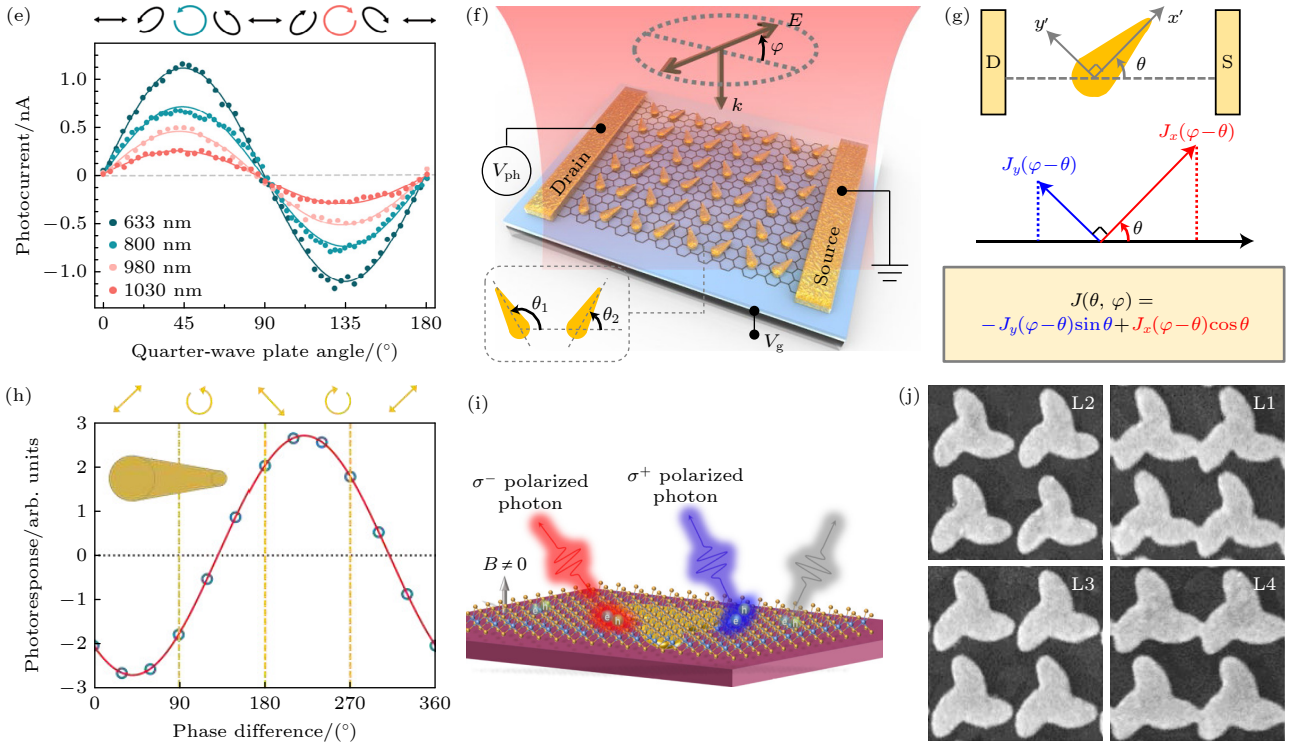


图 7 (a) 宽带 CPL 光电探测器的器件结构^[76]; (b) 线偏振光和 CPL 照射下等离子体超表面接触的电场分布^[76]; (c) LCP 和 RCP 照射下的光电流方向^[76]; (d) 计算得到的波长依赖 CPL 探测率值, 插图为分别在 LCP 和 RCP 光照射下测得的波长扫描光电流^[76]; (e) 不同波长的入射光下实验测量的 1/4 波片角度依赖零偏置光电流^[76]; (f) 纳米天线介导半金属光电探测器示意图^[77]; (g) 通过坐标变换计算取向角为 θ 的锥形纳米天线光响应的示意图^[77]; (h) 圆偏振光 CPL 的模拟光响应^[77]; (i) 在有限垂直磁场 B 下, 具有不同手性等等离子体场的 WSe_2 中量子电子的腔依赖性偏振光子输出示意图^[78]; (j) 等离子体晶格的扫描电子显微镜图像^[78]

Fig. 7. (a) Device structure of a broadband CPL photodetector^[76]; (b) electric field distribution of the plasma super surface under illumination with linearly polarized light and CPL^[76]; (c) light current direction under LCP and RCP irradiation^[76]; (d) calculated wavelength-dependent CPL detection rate values, the In_2Se_3 shows the wavelength-scanned photocurrent measured under LCP and RCP light illumination^[76]; (e) experimental measurement of quarter waveplate angle-dependent zero bias photocurrent for different wavelengths of incident light^[76]; (f) schematic diagram of a nanoscale antenna-mediated semimetal photodetector^[77]; (g) schematic diagram for calculating the cone-shaped nanoscale antenna's light response at an orientation angle of θ ^[77]; (h) simulated light response of CPL^[77]; (i) schematic diagram showing the cavity-dependent polarization photon output of quantum electrons in WSe_2 with different chiral plasma fields under a finite vertical magnetic field $B \neq 0$ ^[78]; (j) scanning electron microscope image of the plasma lattice^[78].

如图 7(j) 所示, 实现了腔控的圆偏振单光子发射, 为片上手性量子光源与量子通信提供了新方案。

手性等离激元结构通过超构表面、纳米天线以及 NPoM 等多种设计途径, 在圆偏振探测中具有优异性能。其通过手性近场调控与 vdW 异质结协同作用, 显著提升 CPL 探测器的灵敏度、对比度和带宽, 实现了偏振信息全解析的集成平台, 具有在量子信息、成像及可穿戴光电子器件中的广阔应用前景。

本节围绕三类等离激元结构与 vdW 材料的协同作用, 探讨了偏振光探测性能的提升机制与应用前景。各向异性等离激元结构利用几何形貌的方向性, 与 vdW 材料 (如 BP, MoS_2 , In_2Se_3) 本征的光

学各向异性产生协同效应, 实现了对线偏振光的高灵敏度、快速响应与宽波段探测。周期性等离激元光栅结构通过亚波长光栅的动量匹配机制, 显著增强了 TM 模式下的光-物质相互作用, 并在石墨烯、 In_2Se_3 、 MoTe_2 等 vdW 材料体系中实现了宽带 TM/TE 模式控制和大面积低成本集成。手性等离激元结构依托几何或材料手性破缺, 与 In_2Se_3 、 WSe_2 等材料结合后可有效区分 LCP/RCP 旋向, 实现高对比度圆偏振探测, 甚至在量子发射器体系中实现了腔控圆偏振单光子发射。表 1 总结了不同等离激元结构对范德瓦耳斯探测器偏振探测器件的增强机制、探测器性能指标以及偏振性能指标。三类结构与 vdW 材料的结合不仅扩展了偏振探测

的维度 (从线偏振到圆偏振), 还通过局域电场增强、模式选择和手性调控等多种机制, 实现了高灵敏度、宽带、可集成的偏振探测器设计路径, 为光通信、偏振成像、安全传输及片上量子信息处理提供了技术基础.

4 应用前景与挑战

4.1 关键应用领域

随着现代光电子技术的快速发展, 高性能偏振敏感器件在光通信、偏振成像与生物传感以及片上光计算等关键领域的需求日益增长. 偏振作为光的基本属性, 承载丰富信息, 能够提供传统强度探测无法实现的多维数据. 然而, 传统偏振探测依赖复杂的光学组件, 限制了器件的小型化与集成度. vdW 材料凭借其独特的层状结构和优异的光电性能, 结合等离子激元效应, 实现了对偏振光的高灵敏度响应和快速选择性探测, 具有广阔的应用前景和巨大的技术潜力.

4.1.1 偏振敏感光通信

在数据通信需求持续增长的背景下, 传统强度调制的光通信系统逐渐面临带宽受限和信号干扰等瓶颈问题^[25]. 偏振敏感光通信技术是利用光的偏振态变化作为信息传输的媒介, 有效提升了通信系统的容量与抗干扰能力^[79]. 尤其在长距离光纤通信中, 偏振模色散对信号质量构成严重威胁, 因而对偏振态的精确调控与实时监测变得尤为关键.

然而, 传统偏振探测方案通常依赖笨重的光学偏振组件, 难以满足现代通信对器件小型化、集成化的迫切需求. 等离子激元-vdW 材料异质结构通过金属纳米结构的偏振选择性与 BP, ReS₂ 等材料的光学各向异性协同作用, 在近红外波段实现了 >20 dB 的消光比和微秒级响应速度, 为高速太赫兹相干通信提供了集成化硬件基础^[80]. 同时, 该类结构具备解调轨道角动量等偏振编码新格式的能力, 有助于显著简化数字信号处理算法的复杂性, 推动偏振编码通信方案的实用化.

Wang 等^[72] 研究了一种基于 In₂Se₃ 与三重旋转对称光栅接触构型的全线性偏振光探测器, 利用偏振选择性 SPPs 诱导的不对称界面, 在零偏压下实现对线偏振角的双极响应. 在可见光波段 (633 nm), 该器件可实现对线性偏振角与光强的同步探测, 光电流增强约 6 倍, 偏振比约为 -1.1. 如图 8(a)–(d) 所示, 该器件通过空间光调制器 (spatial light modulators, SLM) 对图像偏振角进行灰度编码, 并可在解码过程中准确还原 “love” “HNU” 等目标图案, 展示了其在高速、图像级偏振通信中的应用潜力. 此外, Liu 等^[81] 研究了将单层 MoSe₂ 直接集成于等离子激元回路中, 实现了偏振角调控下的二次谐波 (second harmonic generation, SHG) 选择性路由. 如图 8(e), (f) 所示, 该器件在输入偏振调控下展现 14.86 dB 的消光比, 且 SHG 信号强度提升达 13.8 倍, 具备良好的相干性保持能力. 该混合电路结构在片上光频转换、光学逻辑与量子操作等方向具备直接应用潜力.

表 1 不同等离子激元结构对范德瓦耳斯探测器偏振探测器件的增强机制、探测器性能指标、偏振性能指标对比
Table 1. Comparison of plasmonic structures for enhancing polarization-sensitive van der Waals photodetectors: mechanisms, detector metrics, and polarization metrics.

等离子激元结构	二维材料	增强机制	响应度/(A·W ⁻¹)	探测率 D*/Jones	响应时间	偏振比	响应光谱范围	文献
各向异性纳米结构	BP	LSPR	802.42	—	6.36 ps	118.4	615—740 nm 765—865 nm	[63]
	MoS ₂ /In ₂ Se ₃	SPPs	14.2	—	< 90 μs	8.7	1.55—4 μm	[65]
周期性光栅	ReS ₂ /WSe ₂	Mie scattering	28.5	9.81×10 ¹²	上升: 195 ns 下降: 222 ns	1.88	近红外波段	[68]
	石墨烯	SPPs	27.3	—	3.7 ms	12.6	405—532 nm	[59]
	In ₂ Se ₃	SPPs	2.95	0.28×10 ⁷	上升: 39 ms 下降: 32.1 ms	6.65	635—1550 nm	[61]
手性结构	In ₂ Se ₃	SPPs	0.53	2.5×10 ¹⁰	上升: 380 μs 下降: 300 μs	-1.1	633 nm至 近红外波段	[72]
	In ₂ Se ₃	LSPR	0.19	—	上升: 320 μs 下降: 425 μs	1.6×10 ⁴	500—1100 nm	[76]
	MoS ₂	SPPs	~1×10 ⁻⁴	—	< 667 ns 上升: 14 μs 下降: 11 μs	≥ 1	中红外波段	[77]
						3	1200—1600 nm	[95]

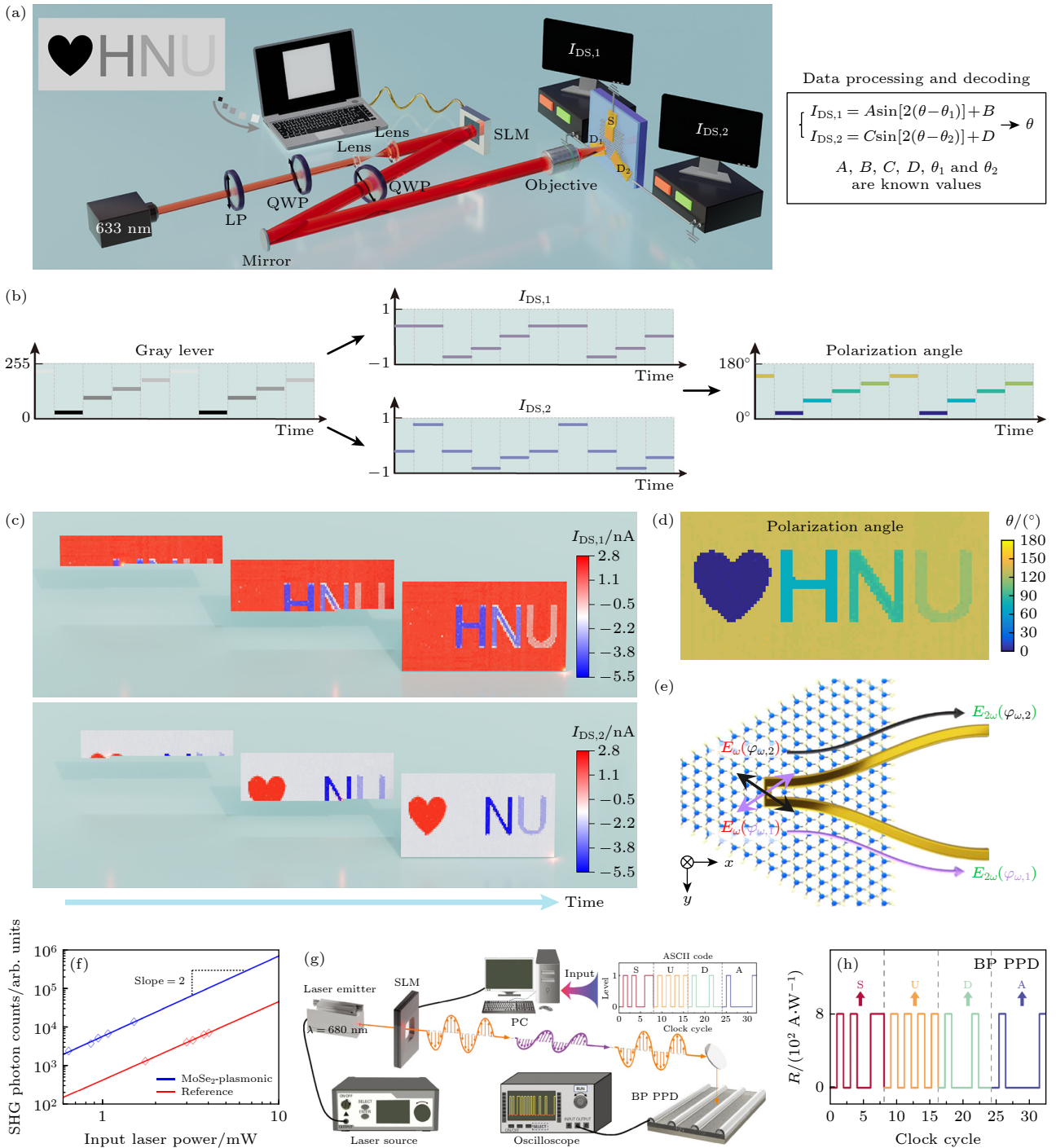


图 8 (a) 偏振信息编码与解码系统示意图^[72]; (b) 输入灰度信号、检测到的光电流 ($I_{DS,1}$ 和 $I_{DS,2}$) 与偏振角之间对应关系的时间依赖性解码过程^[72]; (c) $I_{DS,1}$ 和 $I_{DS,2}$ 的实测光电流结果^[72]; (d) 图案上重建的偏振角信息: 心形为 0° 线性偏振; “H” 字形为 75° 线性偏振; “N” 字形为 90° 线性偏振; “U” 字形为 120° 线性偏振^[72]; (e) MoSe_2 等离子体杂化集成非线性路由器的功能示意图^[81]; (f) 两种电路的二次谐波光子计数随输入激光功率变化的对数-对数曲线^[81]; (g) 基于 BP 光电探测器的光加密通信原理示意图^[63]; (h) BP 光电探测器对接收信号的响应特性^[63]

Fig. 8. (a) Schematic diagram of polarization information encoding and decoding system^[72]; (b) time-dependent decoding process of the correspondence between input grayscale signal, detected photocurrent ($I_{DS,1}$ and $I_{DS,2}$) and polarization angle^[72]; (c) measured photocurrent results of $I_{DS,1}$ and $I_{DS,2}$ ^[72]; (d) reconstructed polarization angle information on the pattern: “Love” shape is 0° linear polarization; “H” shape is 75° linear polarization; “N” shape is 90° linear polarization; “U” shape is 120° linear polarization^[72]; (e) functional schematic diagram of a MoSe_2 plasma hybrid integrated nonlinear router^[81]; (f) log-log curve of second harmonic photon counting for two circuits with respect to input laser power^[81]; (g) schematic diagram of the principle of light encryption communication based on BP photodetector^[63]; (h) response characteristics of BP photodetector to received signal^[63].

Hao 等^[63]研究了基于 BP 纳米线构型的偏振光探测器,通过晶体各向异性与纳米结构引发的等离激元与泄漏模共振,实现 $PR \approx 118.4$, $R \approx 802.42$ A/W、响应时间达 636 ps 的超高性能指标.基于此,该团队实现了无密钥光学加密通信系统,开发出基于偏振识别能力的光学纠错编码方案,如图 8(g), (h) 所示.在该系统中,发送端使用 SLM 调制输出偏振状态,接收端探测器可直接解析偏振信息并输出电信号,实现无需加密密钥的快速且安全的信息解码(如“SUDA”字样的重构),展示了偏振探测在高安全性通信系统中的应用前景.

综上,基于等离激元增强的 vdW 材料器件在偏振敏感光通信系统中具有优异的性能与多样的功能,成为推动下一代光通信技术发展的关键支撑技术.

4.1.2 片上光计算与信息处理

在传统片上光计算体系中,偏振态作为一种独立的物理自由度,可在不增加物理空间占用的前提下显著提升单位芯片面积的信息承载密度,成为突破算力瓶颈的重要路径之一. vdW 材料(如 BP^[65], ReS₂^[82])因其本征的面内各向异性,具有对不同偏振方向的光吸收与载流子迁移率的差异性响应,为偏振态信息编码提供了天然材料基础^[83].

然而,实现高效、集成的偏振信息处理仍面临光物质相互作用效率低的挑战.引入金属纳米光栅、天线等等离激元结构,可通过局域表面电场增强和偏振选择性共振机制,放大材料对 TE/TM 偏振的响应差异^[84].这种“材料本征各向异性等离激元共振增强”的耦合机制,使偏振态不仅能作为可控变量,还可参与信息编码与逻辑操作.例如,不同偏振方向可映射为“0”与“1”两种逻辑状态,用于实现偏振逻辑门,从而理论上实现片上信息处理密度翻倍^[85].片上光计算核心器件如全光与门、或门、非门等,其性能高度依赖于材料的非线性光学响应能力^[86].

Hou 等^[87]研究了一种具备片上逻辑处理与信息加密功能的超材料增强型近红外光电探测器.该器件基于非对称等离激元结构与叉指电极设计,在提升中红外吸收与响应度的同时,实现了热电子自驱动功能.相较传统结构,该系统响应度提高一个数量级,且能够基于光电输入输出执行逻辑运算(AND, OR, XOR),如图 9(a)—(c) 所示.进一步

地,该探测器集成于中红外通信网络中,通过 ASCII 码将信息转换为偏振光信号,并利用等离激元增强探测器进行 XNOR 逻辑加密/解密操作,如图 9(d), (e) 所示,成功完成“HIAS”加密图像的传输与还原,展示了该器件在高安全性、集成化通信系统中的巨大潜力.

此外,He 等^[76]研究了一种基于梯度超表面接触结构的零偏压 CPL 探测器.该器件通过 In₂Se₃ 薄片与 CPL 选择性超表面电极的集成,在 500—1100 nm 波段实现了高达 1.6×10^4 的区分度,并对非 CPL 信号表现出优异的免疫特性.依托等离激元诱导的表面波单向传播效应,该器件在无外加偏压下即可产生矢量化光电流.进一步地,该 CPL 探测器被应用于多值偏振光逻辑系统,实现了圆偏振加密信息的解码,如图 9(f), (g) 所示,提供了低功耗、安全光逻辑平台的新路径.基于 vdW 材料与等离激元结构协同设计的偏振调控器件,为实现高密度、低功耗、安全可重构的片上光计算与信息处理系统提供了重要支撑,推动了集成光子学在新一代信息处理与加密通信中的应用实现.

4.1.3 仿真视觉与图像识别

传统偏振成像技术成像系统体积较大、光谱响应范围受限、抗干扰能力弱,难以满足高分辨率成像与实时识别的需求.在生物医学中,偏振光声成像受限于穿透深度和对比度,不足以早期识别肿瘤微环境^[88];在遥感领域,雾霾天气下偏振信息提取精度明显下降^[89].为应对上述挑战,二维范德瓦耳斯材料(如 TMDs, BP, In₂Se₃ 等)凭借原子级厚度、面内光学各向异性与可调控的电子带结构,为实现高灵敏、高集成的偏振探测系统提供了全新路径.然而,由于二维材料吸收层极薄,其本征光电响应仍有限,需结合等离激元结构提升光-物质相互作用效率^[56].

Che 等^[90]利用 PdSe₂/2H-MoTe₂ 异质结探测器,实现对线偏振光与圆偏振光的探测,1064 nm 下偏振比达 2,同时具有优异的宽带自驱动光探测能力(375—2200 nm),在 532 nm 下响应度高达 7.3×10^3 A/W,1310 nm 近红外仍可达 20 A/W,响应时间分别为 45/71.5 μs. Liu 等^[56]进一步研究了一种基于全二维材料集成的片上偏振探测系统,在红外波段具有高达 60 以上的各向异性比与 4.4×10^3 以上的开关比,验证了该方案在高分辨

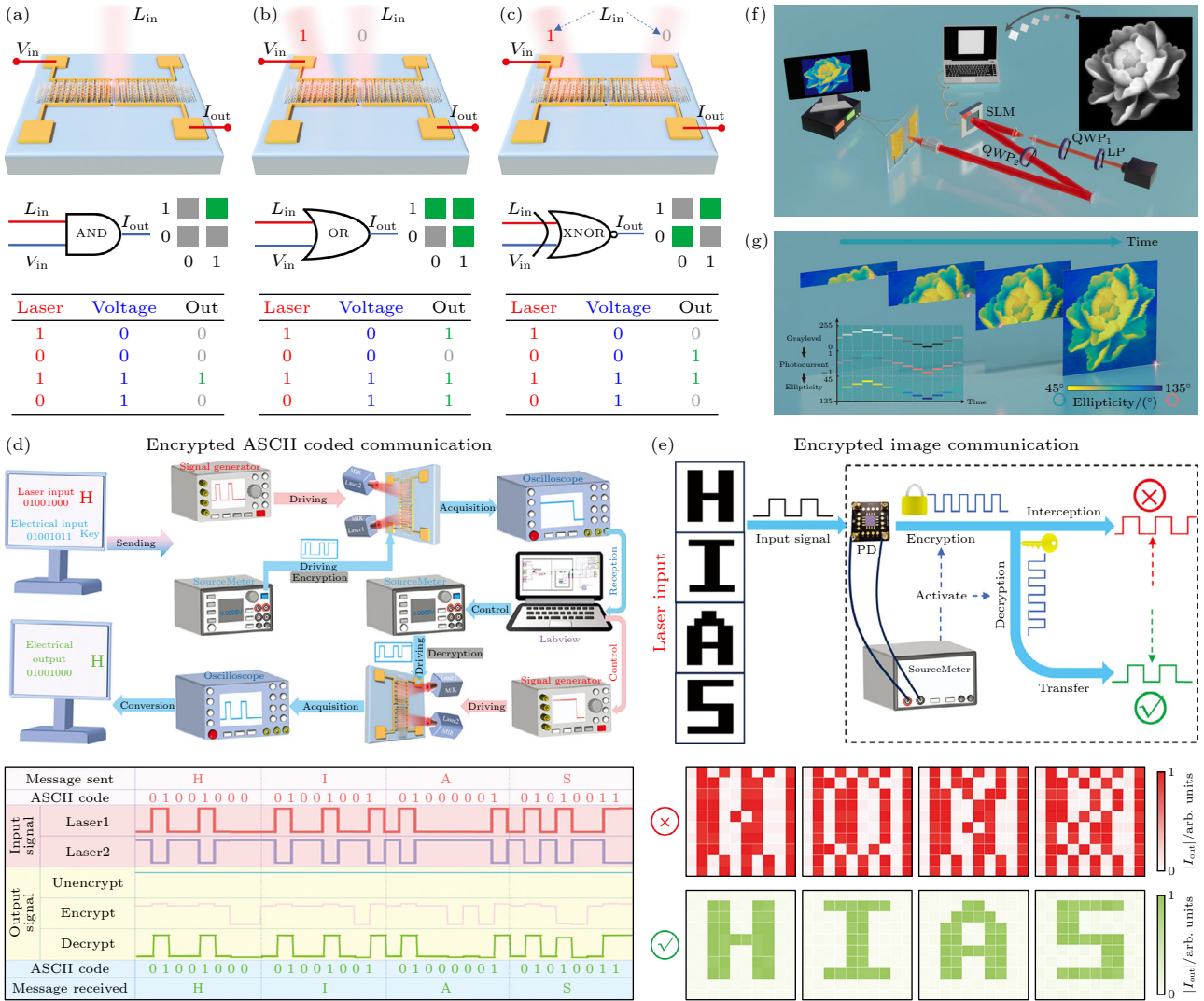


图 9 (a)–(c) 逻辑与、或及 XNOR 运算系统示意图, 包含混合光电信号输入, 以及逻辑与、或及 XNOR 运算的符号化示意图与真值表^[87]; (d) 加密/解密光通信系统设计示意图^[87]; (e) 加密图像传输演示^[87]; (f) 偏振信息编码和解码的实验装置^[76]; (g) 随时间变化的解码图像^[76]

Fig. 9. (a)–(c) Schematic diagrams of logical AND, OR, and XNOR operation systems, including mixed photoelectric signal inputs, as well as symbolic schematic diagrams and truth tables^[87]; (d) schematic diagram of an encrypted/decrypted optical communication system design^[87]; (e) demonstration of encrypted image transmission^[87]; (f) experimental device for encoding and decoding polarization information^[76]; (g) decoded images over time^[76].

偏振图像识别中的有效应用.

二维材料与等离激元结构的协同工作提升了仿生神经形态视觉处理系统的灵敏度. Wu 等^[91]报道了一种基于石墨烯的方向可调 SPP 波导光探测器. 该器件通过金属狭缝结构激发和调控 SPPs 传播方向, 近场增强效应有效提升了二维材料对弱光的吸收和响应速度, 在光电流中展现出高达 400% 以上的偏振对比度. 结合卷积神经网络 (convolutional neural network, CNN), 此类具方向选择性的偏振分辨输出可作为类“卷积核”信号输入, 用于目标识别和图像处理, 展示出在片上集成视觉感知与智能

识别中的应用潜力. Zhang 等^[92]受人类视觉感知模块启发, 研究了 MoS₂-银纳米光栅阵列的光电晶体管神经网络架构, 如图 10(a) 所示, 系统可实现零延迟图像感知、预处理与识别, 在仿人视网膜与视觉皮层功能机制下具有大动态范围 (180 dB)、高速响应 (500 ns) 及极低能耗 (每脉冲 2.4×10⁻¹⁷ J). 该系统支持对含噪图像进行对比度增强、降噪等预处理, 如图 10(b) 所示, 通过调节每个像素栅压可逐步恢复图像特征, 如图 10(c) 所示, 最终输出的编码电流与图像字母高度一致, 证明其在仿真视觉系统中的实用性.

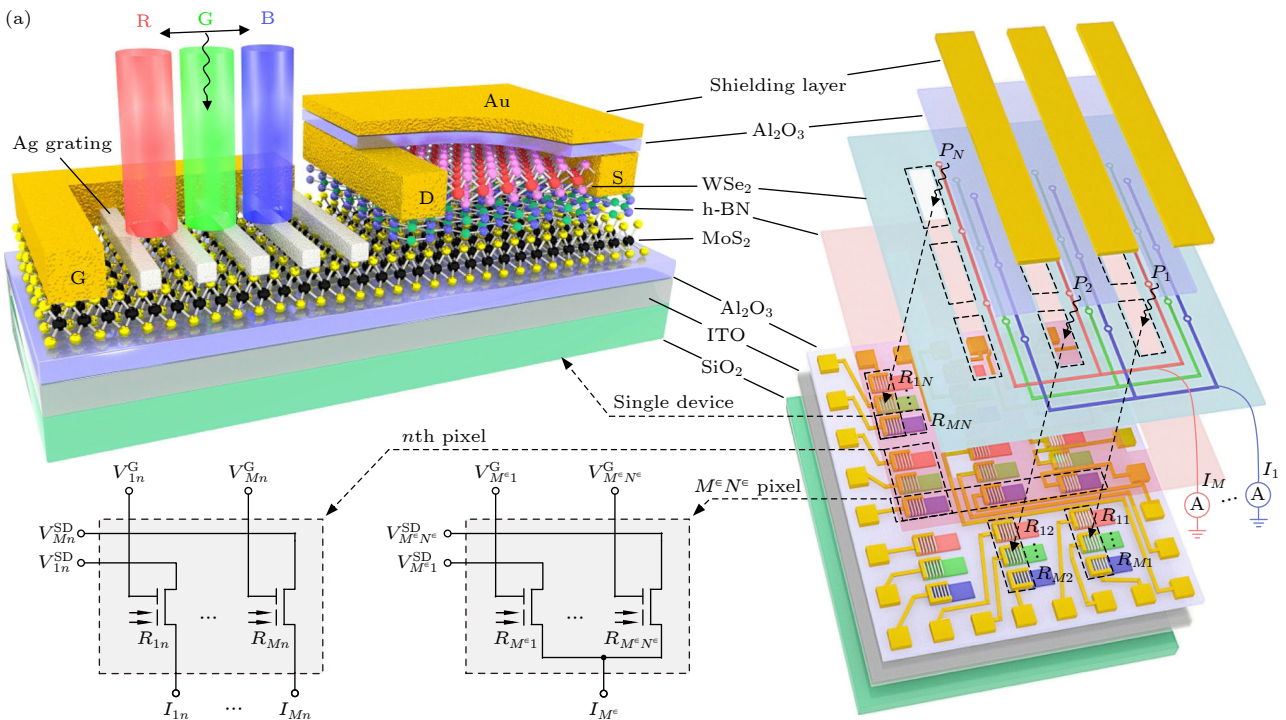
Bai 等^[93]提出了一种基于单层 MoSe₂-H 型等离激元超构表面的多偏振敏感光探测器. 该结构利用几何手性与各向异性, 实现了对圆偏振光 (810 nm 下 CD = 0.35) 和线偏振光 (633 nm 下 LP = 0.4) 的同步探测, 性能优于传统手性或各向异性材料器件. 其偏振分辨光电流可直接作为具方向选择性的“光学卷积核”, 在传感端完成特征预处理, 再结合 CNN 实现图像识别与场景理解. 该工作展示了二维材料与等离激元结构在多偏振探测及智能视觉应用中的集成潜力. Jiang 等^[94]开发了一种等离激元超表面-石墨烯光电探测器, 如图 10(d) 所示, 利用该结构的双极性偏振极化功能, 通过图 10(e) 所示的极性与幅度各异的矢量光电流编码, 实现了偏振与波长等多维信息的解耦. 该器件能够同时探测并区分宽带光 (1–8 μm) 的各种偏振态和波长, 波长预测精度达 0.5 μm. 该研究进一步拓展了协同多端口超表面结构并结合机器学习技术, 实现了在极宽带范围内的精确自旋-波长分辨. 在此基础之上, Deng 等^[95]提出了一种基于光电偏振的片上全斯托克斯偏振计, 如图 10(f), (g) 所示, 通过调控超表面的几何排列构成优化的光电转换矩阵, 将入射光的斯托克斯参数设置为不同幅度和极性的光电流, 实现了对任意光强下全偏振态误差 < 1% 的重建. 该设计利用超表面结构对光场偏振态高灵敏度的响应, 在无需传统分立光学

元件的情况下完成偏振信息的提取与解码, 为仿生视觉传感器中模拟生物偏振视觉机制 (如昆虫复眼偏振导航) 的应用提供了有效路径.

二维范德瓦耳斯材料与等离激元增强机制的结合, 促使仿真视觉与图像识别技术向着高集成、高性能与类脑智能的方向发展, 将在自动驾驶、安防监控、脑机接口与医疗成像等关键应用场景中发挥核心作用.

4.2 挑战与展望

等离激元增强二维材料偏振探测器件实现了性能突破与应用拓展, 但其在器件性能、系统集成等方面仍面临挑战. 首先, 传统贵金属 (如 Au, Ag) 等离激元材料在可见-近红外波段具有强烈局域场增强效应, 但其自由载流子导致的欧姆损耗对器件的光电转换效率具有一定影响^[96]. 研发低损耗二维等离激元材料 (如石墨烯、MXene^[97]、氮化硼等) 以及设计拓扑等离激元结构^[98], 可实现可调谐、高品质因子的偏振调控结构, 为低损耗偏振探测器的实现夯实基础. 其次, 需要对高性能偏振感知, 能带调控与光响应机制进行进一步研究. 研究各向异性二维材料 (如 ReS₂, GeSe₂) 与各类等离激元共振结构的耦合机制, 实现方向选择性吸收与偏振电导响应的增强^[99]. 此外, 探索拓扑等离激元结构与范德瓦耳斯异质结构的协同调控机制, 使其



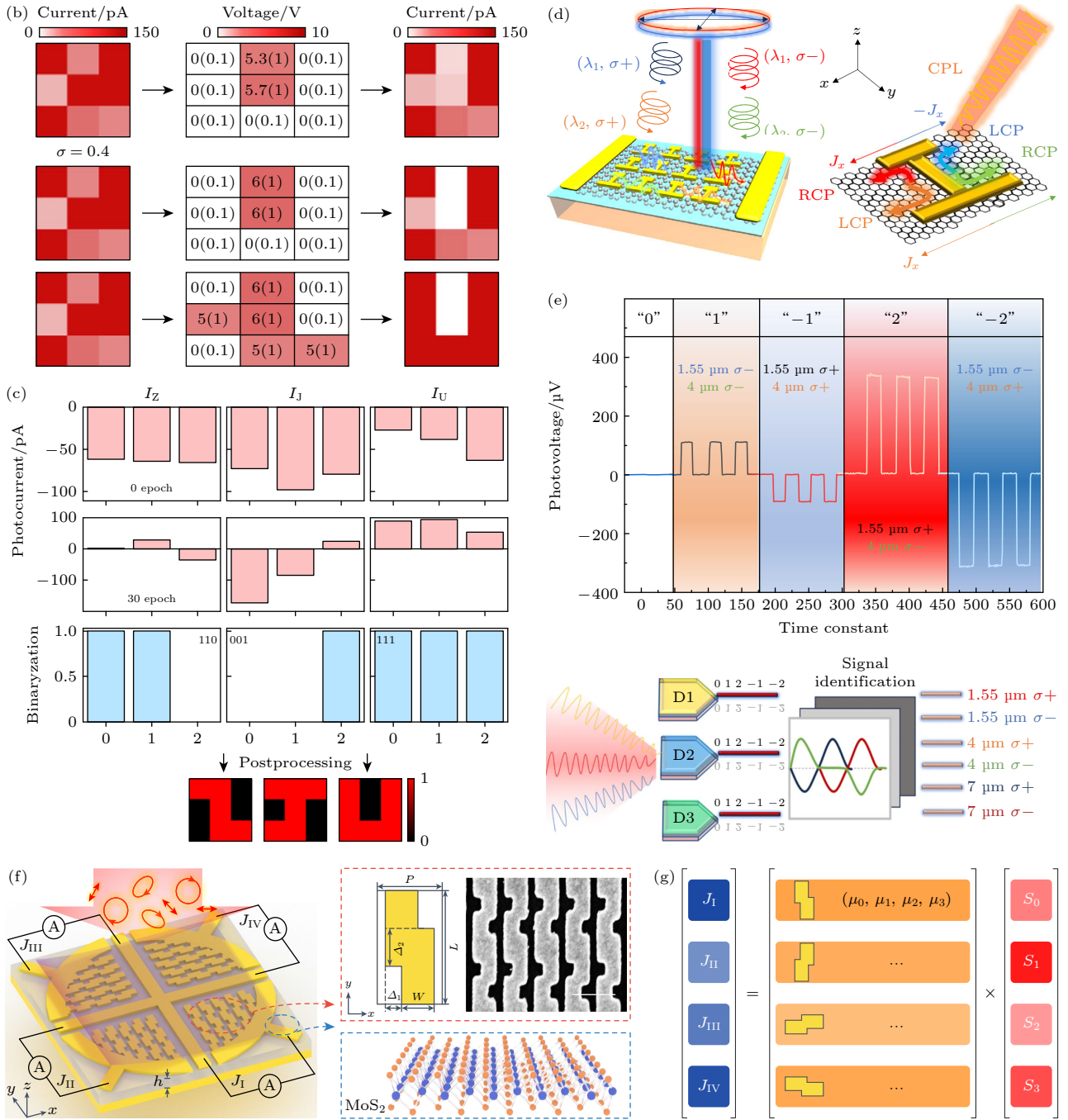


图 10 (a) MoS₂-Ag 纳米光栅阵列的光电晶体管神经网络架构示意图^[92]; (b) 图像的预处理过程^[92]; (c) 入射波长 1064 nm 时零偏压下偏振光响应率的极化图谱^[92]; (d) 石墨烯上的双臂超表面结构实现圆偏振光、左旋圆偏振光和右旋圆偏振光探测矢量分离^[94]; (e) 双光入射模式下对应的编码光电压输出信号及三波长圆偏振信号提取的示意图^[94]; (f) 芯片级全斯托克斯偏振仪结构示意图, 插图展示 Z 形超表面的扫描电子显微镜图^[95]; (g) 优化光电转换矩阵表示法^[95]

Fig. 10. (a) Schematic diagram of the MoS₂-Ag nanograting array structure^[92]; (b) image preprocessing process^[92]; (c) comparison of image recognition rates before and after preprocessing^[92]; (d) the dual-arm metasurface structure on graphene can localize light of different wavelengths and handedness on either side of the dual arms, generating vectorial photocurrents^[94]; (e) corresponding encoded photovoltage output signal in dual light incidence mode^[94]; (f) schematic of the on-chip full-Stokes polarimeter^[95]; (g) matrix representation of the OCM^[95].

在偏振保持与高保真度信息传输的应用展现独特优势^[100].

在器件性能与功能方面, 目前大多数偏振探测

器仍集中于单波长、单偏振态识别, 限制其在多模感知场景中的应用. 通过实现多波长等离激元共振结构、异质层间带隙梯度调控机制, 可拓展器件的

光谱响应范围. 同时, 引入外加栅压、电场或光控机制 (如铁电调控或光致形变材料) 实现偏振角度与响应谱宽的动态调节, 完成对自适应偏振探测系统进一步探索^[101]. 同时, 针对电控偏振调控存在功耗与延迟问题, 基于光控效应 (如光致色变^[102]、光热调制^[103]、光诱导载流子迁移^[104]等) 实现纯光偏振调控, 为实现无电驱、可穿戴、生物兼容偏振探测系统提供可能.

在系统的智能集成方面, 传统偏振器件主要承担感知功能, 但不具备信号识别与误差校准能力. 随着人工智能算法 (如 CNN 等) 与光电硬件的融合, 偏振探测系统可实现“感知-识别-反馈”闭环. 如阵列光电晶体管与神经网络耦合系统, 可实现图像去噪、偏振编码识别等前端智能化处理任务^[105], 显著提升识别精度与处理速度. 未来大规模应用要求偏振探测器能与硅光、LNOI、III-V 等主流平台实现异质集成. 目前二维材料与 CMOS 兼容平台间的集成仍面临热稳定性差、界面污染、工艺适配性差等问题^[106]. 需发展低温转移工艺、界面钝化层, 以及可重构光子结构等技术^[107], 提升集成密度与互联能力, 推进高性能偏振探测器在边缘计算、感知网络与无人系统中的应用.

5 总 结

等离激元增强 vdW 材料的偏振探测器, 为新一代高性能偏振探测器的实现提供了重要的技术方案. 具有局域场增强与偏振选择性的等离激元结构与 vdW 材料优异的光电响应、可控的带隙与异质集成优势结合, 有效提升了器件对不同偏振态的分辨能力. 然而, 器件的实际应用仍面临材料特性、加工成本、响应带宽、系统智能化等多方面挑战. 未来研究应着重发展低损耗新型等离激元材料、提升与 CMOS 平台的兼容性, 并探索全光调控与机器学习辅助的智能偏振探测体系. 基于二维材料与等离激元增强机制的偏振探测技术有望在通信、成像、量子信息等领域发挥核心作用, 推动偏振探测从基础感知迈向智能认知的新阶段.

参考文献

- [1] Sun Y L, Zhang X G, Cui T J, Jiang W X 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2421870
- [2] Su C, Li M Y, Yan H, Zhang Y, Li H, Fan W H, Bai W J, Liu X J, Wang Q G, Yin S G 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 5213
- [3] Wang F K, Fang S, Zhang Y, Wang Q J 2025 *Nat. Commun.* **16** 6791
- [4] Wei Z M, Xia J B 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 163201 [魏钟鸣, 夏建白 2019 *物理学报* **68** 163201]
- [5] Li X, Liu K, Wu D, Lin P, Shi Z, Li X, Zeng L, Chai Y, Lau S P, Tsang Y H *Adv. Mater.* **24** 15717
- [6] Wu J H, Wei M L, Mu J L, Ma H, Zhong C Y, Ye Y T, Sun C L, Tang B, Wang L C, Li J Y, Xu X M, Liu B L, Li L, Lin H T 2021 *ACS Nano* **15** 15982
- [7] Wu J H, Ye Y T, Jian J L, Yao X P, Li J Y, Tang B, Ma H, Wei M L, Li W, Lin H T, Li L 2023 *Nano Lett.* **23** 6440
- [8] Chang H, Hur W, Kang H, Jun B H 2025 *Light-Sci. Appl.* **14** 79
- [9] Jian J L, Liu R Z, Ye Y T, Wu J H, Deng Q Y, Wei M L, Tang Y H, Tang R J, Sun B S, Ma H, Shi Y L, Zhong C Y, Sun C L, Lin H T, Li M, Li L 2024 *Adv. Opt. Mater.* **12** 2400281
- [10] Im H, Bantz K C, Lee S H, Johnson T W, Haynes C L, Oh S H 2013 *Adv. Mater.* **25** 2678
- [11] Wei H, Xu H X 2014 *Mater. Today* **17** 372
- [12] Lee J J, Han S J, Choi C, Seo C, Hwang S, Kim J, Hong J P, Jang J, Kyhm J, Kim J W, Yu B S, Lim J A, Wang G, Kang J, Kim Y, Ahn S K, Ahn J, Hwang D K 2025 *Nat. Commun.* **16** 4624
- [13] Kwon S, Lee S Y, Choi S H, Kang J W, Lee T, Song J, Lee S W, Cho C H, Kim K K, Yee K J, Kim D W 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 44088
- [14] Alamri M, Liu B, Sadeghi S M, Ewing D, Wilson A, Doolin J L, Berrie C L, Wu J 2020 *ACS Appl. Nano Mater.* **3** 7858
- [15] Jian J L, Wu J, Zhong C, Ma H, Sun B, Ye Y, Luo Y, Wei M, Lei K, Liu R, Chen Z, Li G, Dai H, Tang R, Sun C, Li J, Li W, Li M, Lin H, Li L 2023 *ACS Photonics* **10** 3494
- [16] Bai Q H, Huang X, Guo Y, Du S, Sun C, Hu L Y, Zheng R X, Yang Y, Jin A Z, Li J J, Gu C Z 2023 *Nano Res.* **16** 10272
- [17] Zhong C Y, Liao K, Dai T X, Wei M L, Ma H, Wu J H, Zhang Z B, Ye Y T, Luo Y T, Chen Z Q, Jian J L, Sun C L, Tang B, Zhang P, Liu R N, Li J Y, Yang J Y, Li L, Liu K H, Hu X Y, Lin H T 2023 *Nat. Commun.* **14** 6939
- [18] Drude P 1900 *Ann. Phys.* **306** 566
- [19] Huang J A, Luo L B 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701282
- [20] Tong J C, Suo F, Ma J H, Tobing L Y M, Qian L, Zhang D H 2019 *Opto-Electron. Adv.* **2** 180026
- [21] Zayats A V, Smolyaninov I I, Maradudin A A 2005 *Phys. Rep.* **408** 131
- [22] Grundmann M (Grundmann M ed) 2021 *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Nanophysics and Applications* (Cham: Springer International Publishing) pp339–350
- [23] Maier S A (Maier S A ed) 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (New York, NY: Springer US) pp65–88
- [24] He W D, Su D, Wang S J, Zhou H L, Chen W, Zhang X Y, Zhao N, Zhang T 2021 *Infrared and Laser Eng.* **50** 120 (in Chinese) [何伟迪, 苏丹, 王善江, 周桓立, 陈雯, 张晓阳, 赵宁, 张彤 2021 *红外与激光工程* **50** 120]
- [25] Wang J, Jiao H X, Chen Y, Wu S Q, Wang X D, Zhang S K, Chu H J, Wang J L 2024 *Acta Photonica Sin.* **53** 3 (in Chinese) [王菁, 焦韩雪, 陈艳, 伍帅琴, 王旭东, 张书魁, 褚君浩, 王建禄 2024 *光子学报* **53** 3]
- [26] Seied Ali Safiabadi T, Zhou W 2019 *Nanophotonics* **8** 1199

- [27] Kasani S, Curtin K, Wu N 2019 *Nanophotonics* **8** 2065
- [28] Hutter E, Fendler J H 2004 *Adv. Mater.* **16** 1685
- [29] Zhang X N, Nie C B, Jiang X L, Zhu L, Wei X Z 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** 2402794
- [30] Su J T, Hou X Q, Dai N, Li Y 2024 *Front. Phys.* **19** 63501
- [31] Amendola V, Pilot R, Frascioni M, Marago O M, Iati M A 2017 *J. Phys. Condens. Matter* **29** 203002
- [32] Rycenga M, Cobley C M, Zeng J, Li W, Moran C H, Zhang Q, Qin D, Xia Y 2011 *Chem. Rev.* **111** 3669
- [33] Mie G 1908 *Ann. Phys.* **330** 377
- [34] Dorodnyy A, Smajic J, Leuthold J 2023 *Laser Photon. Rev.* **17** 1
- [35] Ge L X, Han D Z, Zi J 2015 *Opt. Commun.* **354** 225
- [36] Kinsey N, Ferrera M, Shalaev V M, Boltasseva A 2015 *J. Opt. Soc. Am. B* **32** 121
- [37] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nat. Photonics* **2** 496
- [38] Dai D X, He S L 2009 *Opt. Express* **17** 16646
- [39] Zhu B Q, Tsang H K 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 2467
- [40] Dai D X, He S L 2010 *Opt. Express* **18** 17958
- [41] Echtermeyer T J, Milana S, Sassi U, Eiden A, Wu M, Lidorikis E, Ferrari A C 2016 *Nano Lett.* **16** 8
- [42] Ma P, Salamin Y, Baeuerle B, Josten A, Heni W, Emboras A, Leuthold J 2019 *ACS Photonics* **6** 154
- [43] Ma Z Z, Kikunaga K, Wang H, Sun S, Amin R, Maiti R, Tahersima M H, Dalir H, Miscuglio M, Sorger V J 2020 *ACS Photonics* **7** 932
- [44] Ding Y H, Cheng Z, Zhu X L, Yvind K, Dong J J, Galili M, Hu H, Mortensen N A, Xiao S H, Oxenløwe L K 2020 *Nanophotonics* **9** 317
- [45] Craciun A-M, Stoia D, Azziz A, Astilean S, Focsan M, Lamy de la Chapelle M 2025 *RSC Adv.* **15** 20848
- [46] Alsawafta M 2025 *Plasmonics* **1** 1
- [47] Abb M, Wang Y, Papasimakis N, de Groot C H, Muskens O L 2014 *Nano Lett.* **14** 346
- [48] Nelayah J, Kociak M, Stéphan O, García de Abajo F J, Tencé M, Henrard L, Taverna D, Pastoriza-Santos I, Liz-Marzán L M, Colliex C 2007 *Nat. Phys.* **3** 348
- [49] Li Y, DiStefano J G, Murthy A A, Cain J D, Hanson E D, Li Q, Castro F C, Chen X, Dravid V P 2017 *ACS Nano* **11** 10321
- [50] Alamri M, Gong M, Cook B, Goul R, Wu J Z 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 33390
- [51] Khurgin J, Bykov A Y, Zayats A V 2024 *eLight* **4** 15
- [52] Wang W H, Besteiro L V, Yu P, Lin F, Govorov A O, Xu H X, Wang Z M 2021 *Nanophotonics* **10** 1911
- [53] Lei D Y, Su D, Maier S A 2024 *Light-Sci. Appl.* **13** 243
- [54] Xu X H, Dutta A, Khurgin J, Wei A, Shalaev V M, Boltasseva A 2020 *Laser Photon. Rev.* **14** 1900376
- [55] Yang W X, Liu Y W, Cullen D A, McBride J R, Lian T Q 2021 *Nano Lett.* **21** 4036
- [56] Liu Z L, Liu M X, Qi L J, Zhang N, Wang B, Sun X J, Zhang R J, Li D B, Li S J 2025 *Light-Sci. Appl.* **14** 68
- [57] Yuan F Y, Ye Z, Fan Z, Lin B, Hui L, Jun P L, Zhen H N 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 058501
- [58] Chen S, Cao R, Chen X, Wu Q, Zeng Y H, Gao S, Guo Z N, Zhao J L, Zhang M, Zhang H 2020 *Adv. Mater. Interfaces* **7** 1902179
- [59] Yan J H, Yang X Z, Liu X Y, Du C, Qin F, Yang M M, Zheng Z Q, Li J B 2023 *Adv. Sci.* **10** 2207022
- [60] Randerson S A, Zotev P G, Hu X, Knight A J, Wang Y, Nagarkar S, Hensman D, Wang Y, Tartakovskii A I 2024 *ACS Nano* **18** 16208
- [61] Fan C R, Sun X J, Shi Z M, Lü B C, Chen Y, Li S J, Liu J M 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2202860
- [62] Rizvi M H, Wang R, Schubert J, Crumpler W D, Rossner C, Oldenburg A L, Fery A, Tracy J B 2022 *Adv. Mater.* **34** 2203366
- [63] Hao Y N, Hang T Y, Chen C H, Zhang C Z, Chen Y J, Yu C C, Wu S L, Yang J, Yang Z H, Li X F, Cao G Y 2024 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2416475
- [64] Lu Z Y, Ji J M, Ye H M, Zhang H, Zhang S P, Xu H X 2024 *Nat. Commun.* **15** 8803
- [65] Venuthurumilli P K, Ye P D, Xu X 2018 *ACS Nano* **12** 4861
- [66] Li H Y, Zhao J Y, Wang Y Z, Liu H T, Chen Q Y, Bao Y L, Zhou M E, Li Y, Sang Y T, Yang F, Nie Z H 2025 *ACS Nano* **19** 7391
- [67] Chen J B, Tang D X, Xie Y, Gu C J, Liu Z J, Lu P F, Shen X 2024 *Laser Technol.* **48** 867 (in Chinese) [程佳宝, 唐大秀, 谢颖, 顾辰杰, 刘自军, 芦鹏飞, 沈祥 2024 *激光技术* **48** 867]
- [68] Chu Y T, Chen P L, Huang S H, Yadav S N S, Syong W R, Mao C H, Lu Y J, Liu C H, Wu P C, Yen T J 2025 *ACS Nano* **19** 18545
- [69] Wen T, Zhang W D, Liu S, Hu A Q, Zhao J Y, Ye Y, Chen Y, Qiu C W, Gong Q H, Lu G W 2020 *Sci. Adv.* **6** eaao0019
- [70] Ray S K, Chandel S, Singh A K, Kumar A, Mandal A, Misra S, Mitra P, Ghosh N 2017 *ACS Nano* **11** 1641
- [71] Zhao B, Zhang Z M 2015 *ACS Photonics* **2** 1611
- [72] Wang C H, He C L, Liu L, Tang Z L, Wang Y F, Wang H L, Liu W Q, Wang X, Wang X X, Pan A L 2025 *Nano Lett.* **25** 5794
- [73] Li R Z, Zhang X L, Zhong F, Yu Y F, Yan P D, Lei D Y, Lu J P, Ni Z H 2025 *Adv. Opt. Mater.* **13** 2402668
- [74] Huang T Y, Tu X C, Shen C Q, Zheng B J, Wang J Z, Wang H, Khaliji K, Park S H, Liu Z Y, Yang T, Zhang Z D, Shao L, Li X S, Low T, Shi Y, Wang X M 2022 *Nature* **605** 63
- [75] Zhu Y, Zou K L, Qi D X, He J, Peng R W, Wang M 2025 *Nano Lett.* **25** 8680Y
- [76] He C L, Tang Z L, Wang C H, Wang Y F, Hua Q Z, Liu L, Wang X, Schmidt O G, Maier S A, Ren H R, Wang X X, Pan A L 2025 *Adv. Mater.* **37** 2418405
- [77] Wei J X, Xu C, Dong B W, Qiu C W, Lee C K 2021 *Nat. Photonics* **15** 614
- [78] Yang L L, Yuan Y, Fu B W, Yang J N, Dai D J, Shi S S, Yan S, Zhu R, Han X, Li H C, Zuo Z C, Wang C, Huang Y, Jin K J, Gong Q H, Xu X L 2023 *Nat. Commun.* **14** 4265
- [79] Gan W, Liu Y C, Liu X, Xiao R C, Ni K P, Jiang M, Han H, Zhou X Y, Li S J, Wu C Q, Li Y, Li H 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 24943
- [80] Guo J X, Lin L, Li S D, Chen J B, Wang S C, Wu W J, Cai J, Liu Y, Ye J H, Huang W 2022 *ACS Appl. Nano Mater.* **5** 587
- [81] Wu P Y, Lee W Q, Liu C H, Huang C B 2024 *Nat. Commun.* **15** 1855
- [82] Guo T, Li S S, Zhou Y N, Lu W D, Yan Y, Wu Y A 2024 *Nat. Commun.* **15** 6731
- [83] Chen Y Z, Zheng X Y, Zhang X Y, Pan W K, Wang Z, Li S H, Dong S H, Liu F F, He Q, Zhou L, Sun S L 2023 *Nano Lett.* **23** 3326
- [84] Liu Y X, Wang J J, Zhu B B, Wang X H, Zhang S, Liu W F, Shi L, Tao Z S 2025 *Nano Lett.* **25** 2864
- [85] Wang S M, Cheng Q Q, Gong Y X, Xu P, Sun C, Li L, Li T, Zhu S N 2016 *Nat. Commun.* **7** 11490
- [86] Pelgrin V, Yoon H H, Cassan E, Sun Z 2023 *Light Adv. Manuf.* **4** 311
- [87] Hou S C, Han L, Zhang S, Zhang L B, Zhang K X, Xiao K

- N, Yang Y, Zhang Y D, Wen Y F, Mo W Q, Tan Y R, Yao Y F, He J L, Tang W W, Guo X G, Zhu Y M, Chen X S 2025 *Adv. Sci.* **12** 2415518
- [88] Brown E, Brunker J, Bohndiek S E 2019 *Dis. Model. Mech.* **12** 039636
- [89] Jia Q L, Zhang Z D 2024 *Int. J. Remote Sens.* **45** 5224
- [90] Che M Q, Wang B, Zhao X Y, Li Y H, Chang C L, Liu M X, Du Y, Qi L J, Zhang N, Zou Y T, Li S J 2024 *ACS Nano* **18** 30884
- [91] Wu C H, Ku C J, Yu M W, Yang J H, Wu P Y, Huang C B, Lu T C, Huang J S, Ishii S, Chen K P 2023 *Adv. Sci.* **10** 1
- [92] Zhang T, Guo X, Wang P, Fan X Y, Wang Z C, Tong Y, Wang D C, Tong L M, Li L J 2024 *Nat. Commun.* **15** 2471
- [93] Bai Q H, Huang X, Du S, Guo Y, Li C S, Li W, Li J J, Gu C Z 2024 *Nanoscale* **16** 8907
- [94] 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
- [95] Deng J, Shi M D, Liu X S, Zhou J, Qin X Y, Wang R W, Zhen Y R, Dai X, Chen Y Z, Wei J X, Ni Z H, Gao W B, Qiu C W, Chen X S 2024 *Nat. Electron.* **7** 1004
- [96] Maier S A (Maier S A ed) 2007 *Plasmonics: Fundamentals and Applications* (New York, NY: Springer US) pp21–37
- [97] Gogotsi Y, Anasori B 2019 *ACS Nano* **13** 8491
- [98] Song Q H, Odeh M, Zúñiga-Pérez J, Kanté B, Genevet P 2021 *Science* **373** 1133
- [99] Yang Y S, Liu S C, Wang X, Li Z B, Zhang Y, Zhang G M, Xue D J, Hu J S 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900411
- [100] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M 2014 *Nat. Photonics* **8** 821
- [101] Gan W, Ming L, Zhang C T, Peng G H, Cao Z Y, Chen Z, Li Y, Wu C Q, Liu X, Song L 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 34086
- [102] Li H Y, Xiang Z Y, Wang T L, Naik M H, Kim W, Nie J H, Li S Y, Ge Z H, He Z H, Ou Y B, Banerjee R, Taniguchi T, Watanabe K, Tongay S, Zettl A, Louie S G, Zaletel M P, Crommie M F, Wang F 2024 *Nature* **631** 765
- [103] Wan H, Yu S T, Lei Y, Zhao Q, Tao G Y, Luan S Y, Gui C Q, Zhou S J 2021 *Appl. Opt.* **60** 2783
- [104] Yu D J, Cao F, Liao J F, Wang B Z, Su C L, Xing G C 2022 *Nat. Commun.* **13** 6229
- [105] Wang Z J, Wan T, Ma S, Chai Y 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 919
- [106] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [107] Yan Y J, Yan T, Wang F, Zhu Y H, Li S H, Cai Y C, Zhang F Y, Wang Y R, Liu X L, Xu K, He J, Zhan X Y, Lin J, Wang Z X 2025 *Nano Lett.* **25** 6125

SPECIAL TOPIC—2D materials and future information devices

Research progress of polarization performance of plasmon-enhanced van der Waals photodetectors*JIAN Jialing¹⁾²⁾ QIAN Keyu¹⁾ WANG Zijian¹⁾ SU Yuchen¹⁾
WENG Zhengjin¹⁾ XIAO Shaoqing¹⁾²⁾ NAN Haiyan^{1)2)†}¹⁾ (*School of Integrated Circuits, Jiangnan University, Wuxi 214122, China*)²⁾ (*Engineering Research Center of IoT Technology Applications, Ministry of Education, School of Integrated Circuits, Jiangnan University, Wuxi 214122, China*)

(Received 28 August 2025; revised manuscript received 24 September 2025)

Abstract

Polarization detection is a fundamental way to obtain the vectorial nature of light, supporting advanced technologies in the fields of optical communication, intelligent sensing, and biosensing. Two-dimensional van der Waals materials have become a promising platform for high-performance polarization-sensitive photodetectors due to their inherent anisotropy and tunable electronic properties. Nevertheless, their intrinsically weak light absorption and limited photoresponse efficiency remain major bottlenecks. Plasmonic nanostructures, which can achieve strong localized field confinement and manipulation on a nanoscale, provide an effective strategy to overcome these limitations and substantially improve device performance. In this review, we systematically summarize the coupling mechanisms between plasmonic architectures and vdW materials, highlighting near-field enhancement, plasmon-induced hot-carrier generation, and mode-selective polarization coupling as key physical processes for enhancing photocarrier generation and polarization extinction. Representative devices including metallic gratings, hybrid nanoantennas, and chiral metasurfaces are compared in terms of responsivity, detection speed, operating bandwidth, and polarization extinction ratio, revealing consistent improvements of one to two orders of magnitude over bare vdW devices. We further survey emerging applications in the fields of high-speed polarization-encoded optical communication, on-chip optical computing and information processing, and bioinspired vision and image recognition systems, where plasmonic-vdW hybrid detectors demonstrate unique advantages in miniaturization and energy efficiency. Finally, we discuss current challenges such as large-scale fabrication of uniform plasmonic arrays, spectral bandwidth broadening, and seamless integration with complementary photonic circuits, and outline future opportunities for next-generation polarization-resolved optoelectronic platforms.

Keywords: polarization detection, plasmonics, van der Waals materials, surface plasmon polariton, localized surface plasmon resonance

PACS: 85.60.Gz, 42.79.Pw, 95.55.Aq, 81.07.-b**DOI:** [10.7498/aps.74.20251165](https://doi.org/10.7498/aps.74.20251165)**CSTR:** [32037.14.aps.74.20251165](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20251165)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62574101), the National Natural Science Foundation of China's Youth Science Fund (Grant Nos. 52203356, 62364003), the Natural Sciences Research Foundation of Jiangsu Province University, China (Grant No. 2011CB00000), the National Key Laboratory of Integrated Circuit Materials Open Project in 2024 (Grant No. SKLJC-K2024-03), and the Central University Basic Research Plan (Youth Fund Project) of Jiangnan University in 2025, China (Grant No. JUSRP202501033).

† Corresponding author. E-mail: jnanhaiyan@jiangnan.edu.cn



等离激元增强范德瓦耳斯光电探测器偏振性能研究进展

管佳玲 钱科宇 王子坚 苏雨辰 翁正进 肖少庆 南海燕

Research progress of polarization performance of plasmon-enhanced van der Waals photodetectors

JIAN Jialing QIAN Keyu WANG Zijian SU Yuchen WENG Zhengjin XIAO Shaoqing NAN Haiyan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 228502 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20251165

CSTR: 32037.14.aps.74.20251165

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251165>

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

表面等离激元与入射光共同作用下的金纳米结构近场调控

Near-field control of gold nanostructure under joint action of surface plasmon polariton and incident light

物理学报. 2023, 72(17): 175202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230514>

金属基底上光学偶极纳米天线的自发辐射宽带增强: 表面等离激元直观模型

Broadband enhancement of spontaneous emission by optical dipole nanoantenna on metallic substrate: An intuitive model of surface plasmon polariton

物理学报. 2022, 71(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212290>

InSb光栅耦合的太赫兹表面等离激元共振传感方法

A sensing method based on InSb grating coupled terahertz surface plasmon polariton resonance

物理学报. 2024, 73(9): 098701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231904>

范德瓦耳斯材料的原位应变工程与应用

In-situ strain engineering and applications of van der Waals materials

物理学报. 2024, 73(11): 110701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240353>

谐振腔-单层二硫化钼系统中的高阶腔耦合等离极化激元

High-order cavity coupled plasmon polaritons in resonant cavity-monolayer MoS₂ system

物理学报. 2024, 73(22): 227102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241106>

可调谐的声学型石墨烯等离激元增强纳米红外光谱

Tunable acoustic graphene plasmon enhanced nano-infrared spectroscopy

物理学报. 2024, 73(13): 138101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240489>