动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260204001

基于超表面结构的光电探测器研究进展

武靖翔[1,2]，宋玺尧[1,2]，刘家铭[1,2]，刘少尧[1,2]，王　飞[1]，王云鹏[1*]

（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术重点实验室，长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 101400）

摘　要： 超表面通过对入射光的相位、偏振、振幅及共振效应进行精准调控，为光电探测器的性能突破提供了核心解决方案。文章系统阐述超表面调控光场的物理机制及其对光电探测性能的增益原理，全面综述不同波段高性能超表面光电探测器及偏振敏感型器件的研究进展，深入分析材料选取、结构设计及制备工艺对器件性能的调控规律。最后针对当前存在的损耗控制、多功能集成及宽波段适配等瓶颈问题，提出兼具可行性与前瞻性的优化策略，为下一代高性能、集成化光电探测器的研发提供理论参考。

关键词： 超表面；光电探测器；局域表面等离激元共振；偏振检测

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0264－12

Research Progress in Photodetectors Based on Metasurface Structures

WU Jingxiang[1,2], SONG Xiyao[1,2], LIU Jiaming[1,2], LIU Shaoyao[1,2], WANG Fei[1], WANG Yunpeng[1]

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, CHN)

Abstract: Metasurfaces offer a core solution for achieving performance breakthroughs in photodetectors by precisely manipulating the phase, polarization, amplitude, and resonance effects of incident light. This study systematically elucidates the physical mechanisms of metasurface-based light field modulation and the principles underlying their performance enhancement in photodetection. It provides a comprehensive review of the research progress in high-performance metasurface photodetectors, across different wavebands, and polarization-sensitive devices. Furthermore, it presents an in-depth analysis of the regulation of device performance through material selection, structural design, and fabrication processes. Finally, addressing current bottlenecks such as loss control, multifunctional integration, and broadband adaptability, we propose optimization strategies that are both feasible and forward-looking, providing a reference framework for the development of next-generation high-performance, integrated photodetectors.

Key words: metasurface; photodetector; localized surface plasmon resonance; polarization detection

0　引言

自硅基光电二极管实现实用化以来，“光感知”技术已从基础科学探索演进为支撑现代科技发展的核心工程领域。历经数十年发展，光电探测器在

收稿日期：2026－02－04.

基金项目：吉林省自然科学基金-国家重点实验室重大专项（SKL202302025）.

* **通信作者：**王云鹏

像素尺寸(从数十微米缩减至亚微米级)、响应波段(从可见光拓展至太赫兹频段)及阵列规模(突破十亿级像素)方面取得了跨越式进步。其物理本质基于光电效应:半导体吸收光子后激发电子-空穴对,在内建或外加电场作用下分离并被电极收集,最终形成与光强成正比的光电流输出。该类器件已成为成像、光通信、遥感探测、生物医疗、激光雷达及高能物理等重大领域的核心支撑技术[1-6],持续推动人类对光信息的深度开发与利用。

然而,传统光电探测器在性能极致化进程中逐渐遭遇固有物理瓶颈。首先,在光电转换效率与响应速度方面,厚吸收层虽能保证光吸收效率,却延长了载流子渡越时间,导致高速响应与高灵敏度难以兼顾,而薄层结构则面临光吸收不足的困境[7]。其次,在光谱调控方面,光谱选择性依赖于体材料的带隙特性[8],窄带探测通常需要借助外置滤光片、光栅等元件,导致光学系统体积庞大、对准精度要求高且成本高昂[9-10]。此外,器件对入射角度敏感,在广角成像场景中容易出现响应漂移[11],同时缺乏偏振鉴别能力,需额外配置偏振组件才能获取偏振信息[12-14]。在集成与调控层面,三维光学元件与纳米CMOS工艺兼容性差[15],高密度光电集成受阻;探测器只能被动依赖材料体性质吸光,缺乏在亚波长尺度对光场振幅、相位、偏振、角动量的主动、精准、多维调控能力[16-17]。

超表面的出现为攻克上述难题提供了理想的解决方案。作为由金属或介质"超原子"按深亚波长周期排列构成的二维平面结构(厚度仅为数十至数百纳米),其核心优势在于能够通过广义斯涅耳定律引入局域相位、振幅及偏振等突变,实现对光路的任意操控[18-20]。与三维超材料相比,超表面具有损耗低、制备简便、CMOS工艺兼容等特点,可通过单片结构替代透镜、棱镜、波片及光栅等多种体块光学元件,实现聚焦、偏折、分束、成像、偏振分束与窄带滤波等多功能集成[21-24]。自2011年哈佛Capasso教授团队提出V形天线广义斯涅耳定律以来,超表面领域的研究便迅速兴起。随后,其在超透镜、AR/VR、量子测量及生物传感等领域展现出巨大潜力[25-28]。

将超表面与光电探测器深度融合,可将波长选择、偏振筛选、光路塑形及吸收增强等功能压缩至芯片表面,有效突破传统探测器在效率-速度权衡、光谱控制复杂性、角度敏感性及集成化程度等方面的固有局限[29]。本文从超表面调控光场的物理机制出发,综述了近五年内不同性能导向(高性能提升、偏振功能集成)超表面光电探测器的研究进展。通过分析关键影响因素,探讨当前面临的挑战与未来的发展方向,为该领域的持续创新提供理论参考。

1　超表面的光场调控机制与探测性能增益原理

1.1　超表面的光场调控机理

超表面对光场的精准调控,源于其亚波长尺度人工原子(超原子)对电磁波参量的灵活操控。通过定量设计纳米结构的几何形貌、尺寸及空间排布,可激发特定电磁共振模式,在亚波长厚度内实现对光相位、振幅、偏振的多维"裁剪"。其物理基础是广义斯涅耳定律:通过构建横向相位梯度,可产生异常折射/反射效应,实现波前整形与光路任意偏转;结合共振效应可进一步实现异常色散、负折射及涡旋光生成等复杂功能[30]。

模场增强是超表面实现超高灵敏传感、非线性光学及超分辨成像等颠覆性应用的核心物理基石。其本质在于:通过人工设计的亚波长结构,将自由空间传播的光波能量压缩并局域于极小空间体积,从而显著提升局域电场(E)或磁场(H)强度[31],其表达式为:

$$E=\frac{|E_l|^2}{|E_0|^2},H=\frac{|H_l|^2}{|H_0|^2} \tag{1}$$

式中,E和H分别为归一化的电场强度与磁场强度,E_l和H_l分别为局域增强后的电场与磁场强度,E_0和H_0分别是入射电磁场强度。根据构成材料的不同,超表面的模场增强机制可归纳为表面等离激元共振(SPR)与米氏(Mie)共振两类,分别对应金属与介电纳米结构操控光场的两种基本物理路径[32]。

1.1.1　局域表面等离激元共振(LSPR)

表面等离激元是光波激发金属表面自由电子集体振荡形成的电磁模式,其核心特征是将光场压缩至纳米尺度并显著增强局域电磁场。该共振效应的激发需要满足波矢匹配条件,从而引发电子密度周期性涨落,在金属-介电界面形成强局域场增强。这种增强有选择性光吸收、高灵敏传感和强场增强等优异特性,广泛应用于增强拉曼散射、生物传感、光吸收调控、光催化等领域[33-36]。

在光电探测应用中,当入射光频率与金属纳米结构中自由电子集体振荡频率匹配时,会在亚波长尺度的"热点"区域产生强烈的电磁场局域与增强

效应，使光场强度提升数个数量级，如图1所示[37]。

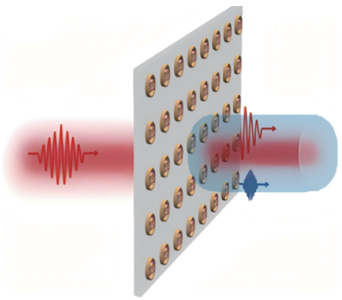


图1 等离激元超表面电磁场局域与增强效应示意图

基于LSPR机制的超表面光电探测器可实现超薄吸收层的高效光捕获：传统探测器需微米级厚度的吸收层以保证吸光效率，而等离激元增强结构通过近场增强与共振能量转移，即使是数十纳米厚的吸收材料也可达到同等甚至更优的光吸收效果[38]。同时，金属纳米结构对偏振与光谱的选择性响应，可赋予单个像元特定的偏振敏感特性，无需外接偏振片即可实现片上偏振成像[39-40]。通过调控纳米结构尺寸、形状与周期，可实现共振波长精准定制，从而为多光谱/高光谱探测提供集成化解决方案[41-43]。

1.1.2 米氏共振

米氏共振是指电磁波与球形（或类球形）微纳米颗粒的散射共振，其本质是电偶极、磁偶极及更高阶多极子共振的叠加效应[44]。基于米氏共振的超表面通过电、磁偶极共振匹配满足广义Kerker条件时，可实现零后向反射、高透射特性；通过特定结构设计将光能束缚于纳米结构内，可实现亚波长尺度的近完美吸收，为高效光电探测器的制备提供基础。

通过优化纳米结构的几何参数与空间排布，可使不同阶多极子模式在特定波长下发生强耦合与干涉，实现极大的局域场增强与辐射方向控制，显著提升谐波产生效率。此外，米氏共振超表面可通过破坏结构对称性实现准连续域束缚态（Quasi-BIC），其极窄的共振谱线赋予器件高Q值窄带滤波与片上光谱传感功能；通过同时调控电、磁多极子共振，还可实现高效的非线性频率转换，拓展光电探测器的功能边界[45-46]。

1.2 超表面对光电探测器的性能增益原理

超表面对光电探测性能的提升主要通过以下途径实现：

1）光吸收增强：通过LSPR或Mie共振效应将光场局域于吸收层附近，显著提升光与物质相互作用效率，在超薄吸收层条件下实现高吸收率，同时避免因厚层结构导致的载流子输运延迟；

2）光谱选择性优化：通过结构参数调控共振波长，实现特定波段的精准响应，无需外置滤光元件，简化光学系统设计；

3）偏振检测集成：利用超表面结构的各向异性或手性特征，实现对特定偏振态的选择性响应，赋予探测器片上偏振检测能力；

4）角度不敏感特性：通过合理设计超表面单元的空间排布与几何形貌，降低器件对入射角度的依赖性，提升广角探测场景下的稳定性；

5）集成化与微型化：超表面的平面化结构与CMOS工艺兼容性，可实现探测功能与光路调控元件的单片集成，大幅缩减器件体积，助力高密度光电集成系统的构建。

光电探测器的核心性能参数包括响应度（R）、外量子效率（EQE）、响应时间（τ）、比探测率（D^*）、暗电流（I_d）等，超表面通过上述增益机制可实现各参数的协同优化：光吸收增强直接提升响应度与EQE；超薄吸收层结构缩短载流子渡越时间，改善响应速度；共振选择性可以抑制非目标波段的光响应，降低暗电流与噪声；偏振与光谱的集成化检测能力则拓展了器件的功能维度[47-50]。

2 高性能超表面光电探测器研究进展

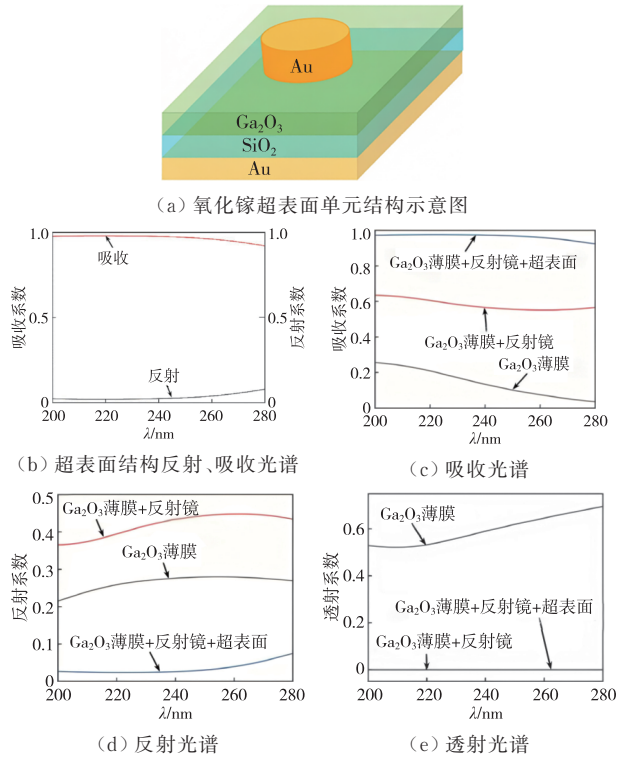
2.1 日盲深紫外波段（200~280 nm）

日盲深紫外光电探测器凭借天然零背景噪声优势，在国防预警、工业检测、安全监测等领域具有不可替代的应用价值[51-53]，其核心研发目标是实现高响应度、低暗电流与快响应速度的协同优化。超表面结构通过增强光吸收效率，可在薄吸收层条件下平衡响应度与响应速度，同时通过结构参数优化实现共振峰与日盲波段的精准匹配。

2023年，南京大学张荣荣课题组[54]提出基于多级同心环状（MCA）超表面结构的金刚石日盲紫外探测器。该探测器基于MCA超表面结构设计，通过表面等离子体共振和局域电场增强双重机制，有效提高了光生载流子的生成效率和收集效率。在215～270 nm波段展现出优异性能：在20 V偏压下，暗电流低至0.27 pA，光暗电流比高达2.4×10^8；215 nm处响应度达0.12 A/W（$EQE\approx70\%$），270 nm处因LSPR效应出现0.083 A/W的次级响

应峰；反射谱验证表明，在 214 nm 和 273 nm 处，其最低反射率分别降至 15.5% 和 19%，光吸收显著增强。该研究在保持低暗电流的同时有效提高了量子效率，但峰值透射率仍有提升空间（最高 85%）。

为突破透射率极限，2025 年，太原师范学院李旺旺课题组[55]提出金纳米柱阵列/氧化镓有源层/二氧化硅绝缘层/底部金反射层的超表面结构日盲探测器。该器件通过顶层的超表面结构与氧化镓有源层以及底部的金反射层组合形成的金属-介质-金属（MIM）多层结构实现等效阻抗的调节，使其在日盲波段与自由空间实现良好的阻抗匹配，从而在 200～280 nm 波段实现平均吸收率大于 92%，峰值吸收率达 98%（218 nm），相较于 15 nm 厚的氧化镓薄膜提升约 45%，且优于 300 nm 厚的薄膜（高 15%）；同时具备偏振不敏感特性（0～90°入射）与大角度稳定性（在 0～50°入射范围内，吸收率大于等于 92%），在可见光区（600～750 nm）的抑制率大于 80%。其结构与光谱特性如图 2 所示，该研究为日盲深紫外探测的工程化应用奠定了基础。



（a）氧化镓超表面单元结构示意图

（b）超表面结构反射、吸收光谱

（c）吸收光谱

（d）反射光谱

（e）透射光谱

图 2　氧化镓超表面单元结构示意图与单元结构反射、吸收及透射光谱[55]

2.2　可见光波段（400~760 nm）

可见光波段光电探测器的材料研发已逐渐从传统无机半导体转向有机半导体、钙钛矿及二维材料等新型体系，这类材料具有制备工艺简便、光谱响应宽、易于异质集成等优势。但也存在缺陷：有机半导体与钙钛矿的载流子迁移率较低，响应速度偏慢；二维材料（如石墨烯）单层光吸收率偏低（仅约 2.3%）。超表面光场局域增强特性为解决该问题提供有效途径，成为当前该领域的核心研究方向。

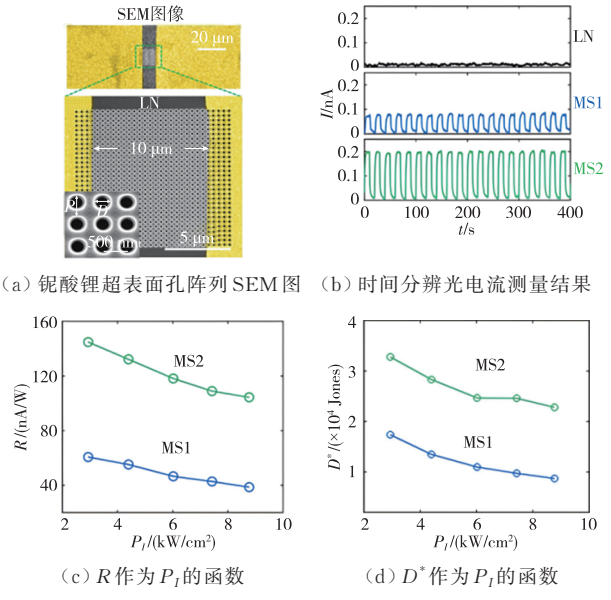
2022 年，南京大学彭如文等[56]研究设计基于杂化有机-无机钙钛矿（HOIP）超表面的宽带光电探测器。该探测器通过引入钙钛矿纳米圆盘超表面阵列抑制了光在空气-钙钛矿界面处的反射，并激发米氏共振使局域产生电磁场的增强，以实现 300～800 nm 波段的宽带吸收增强（提升超过 10 倍）。器件在 380，532 和 710 nm 波长下的响应时间分别低至 4.1，5.1 和 4.5 μs，3 dB 带宽超过 0.26 MHz，有效解决了钙钛矿材料响应速度慢的瓶颈。

2025 年，南京邮电大学李高课题组[57]报道介电超表面增强的多层 WS_2 二维材料光电探测器（2d-DMP）。该器件通过软压印 SU8 纳米柱结构与多层 WS_2 的集成，利用局域共振与表面粗糙度增强光-物质相互作用提高了器件的光吸收效率。其在 532 nm 波段的比探测率 D^* 提升 1 400%，外量子效率提高 900%，响应度增长 750%，同时保持微秒级响应速度（上升时间为 17.3/590 μs，下降时间为 7.9/372 μs），表面粗糙化后反射率降低 46%，吸收增强约 50%，实现了二维材料光吸收效率与探测性能的协同提升。

针对特殊功能需求，2025 年，南开大学任孟欣等[58]提出超表面增强的铌酸锂（LN）薄膜光电探测器，通过周期性纳米孔结构激发导模共振（GMR），显著增强 532 nm 波长下的局域电场。结果表明，共振结构（MS2）的光电流较无结构 LN 薄膜增强 26 倍，响应度达 144.8 nA/W，比探测率为 3.28×10^4 Jones，这拓展了超表面在新型光活性材料光电探测器中的应用范围。其结构及动态响应特性如图 3 所示，其中 MS1 为孔直径 250 nm 的超表面。

从以上可见光波段光电探测器的研究中可以发现，超表面结构通常被视为一种增益手段，但其实际作用远不止于此。凭借纳米级精度的结构设计与卓越的光场调控能力，超表面技术不仅能够提升器件的响应强度、降低响应时间，还能在根本上突破传统探测器的性能极限。通过精准构筑超表面单元，可在亚波长尺度内重构光与物质的相互作用，有效规避材料本征缺陷，如间接带隙导致的光

吸收效率低、固有吸收截面小等瓶颈，从而将探测灵敏度、响应速度及光谱选择性推向新高度[59-61]。



（a）铌酸锂超表面孔阵列SEM图 （b）时间分辨光电流测量结果

（c）R作为P_I的函数 （d）D^*作为P_I的函数

图3 铌酸锂超表面光电探测器SEM图及探测器的动态光电响应[58]

2.3 短波红外（1 000~3 000 nm）

短波红外[62]光电探测器在环境监测、生物成像等领域具有广泛应用，但长期受限于窄带隙半导体外延生长困难、暗电流高及量子效率低等技术瓶颈[63-65]。通过极致的纳米光学结构设计，超表面可大幅增强光与材料的相互作用效率，弥补材料的物理缺陷，将现有材料的探测性能发挥至极限。

2020年，华中科技大学陈长虹课题组[66]提出全硅介质超表面近红外自由载流子吸收增强结构。该结构采用重掺杂p型硅（p^+-Si）纳米孔阵列使得p型硅的空穴浓度大幅提高，引入了显著的介电损耗，在1.53～1.55 μm通信波段激发出M0与M1磁偶极共振，使得入射光局域在纳米孔周围的硅介质中，再配合高空穴浓度的硅对光高效吸收，从而大幅提高器件的光吸收效率。实验测得吸收峰分别达64.4%与38.6%，总吸收大于60%；结合优化法布里-珀罗腔后，吸收率进一步提升至91.3%（M0）和95.0%（M1），实现大于15倍的窄带自由载流子吸收增强，且具备偏振无关、CMOS兼容等优势，为硅基短波红外探测器的发展提供了新路径。

传统短波红外材料锗（Ge）与超表面的结合更为成熟。2023年，南丹麦大学Yezekyan课题组[67]设计的锗超表面宽带近红外光电探测器，工作波长可覆盖1 000～1 600 nm，通过激发锗纳米盘中的磁偶极共振，该共振模式能将入射光场局域在Ge纳米盘内部及下方的薄膜中，显著提高光吸收率与响应度。在4 V偏压下，基于超表面的探测器与平面锗探测器的暗电流均约为12 nA；但在整个工作波段内，超表面器件的响应度显著更高，在1000 nm处达到3倍，在1 550 nm处接近100倍，展现了超表面结构对传统锗材料性能的显著提升。

2025年，浙江大学张志祥课题组[68]提出仿生非对称超表面与连续谱中束缚态（BIC）结合的硅基宽带光电探测器，响应范围覆盖300～1 600 nm。该器件采用Gr/Au/Cr/SiO_2/Si异质结构，通过AAO模板辅助微纳加工构建周期性纳米锥超表面阵列，形成强局域场增强与SPR效应，大幅提升器件在1 550 nm处的光吸收能力。在－1 V偏压下，1 550 nm波长处的响应度为2.46 mA/W，比探测率达3.28×10^9 Jones，EQE为2.1%，响应时间约9 μs，实现了宽波段、高灵敏度的探测性能。

2.4 中波红外（3 000~8 000 nm）

进入中波红外波段[69]，介质超表面的优势逐渐削弱：硅等传统介质材料的吸收损耗增加，折射率下降，且CMOS兼容材料选择减少[70-73]。在此背景下，金属超表面及金属-介质复合超表面凭借其强大的电场局域与近场增强效能，成为中波红外光电探测器性能提升的核心方案。

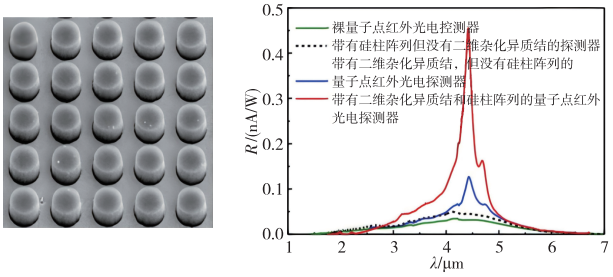
2020年，俄罗斯科学院Yakimov课题组[74]提出一种金属-介质混合超表面结构，通过在Ge/Si QDIP的顶部，制备一个周期为1.3 μm、孔径为1.0 μm的二维方形阵列穿孔金膜。然后，在每个孔洞中制作一个近乎圆柱形的硅微柱（Si pillar），其典型基底直径约为1.0 μm，高度为0.5 μm。Si柱通过金膜的孔洞突出，形成混合超表面结构。该结构利用金属超表面产生的等离激元共振模式与周期性结构产生的瑞利异常于4.4 μm处进行协同耦合，实现了峰值响应度较裸器件提升约15倍，较纯金孔阵列提升4倍；在2～6 μm波段内保持高增强效果，响应度峰值位于4.3～4.5 μm，为中波红外量子点探测器的性能优化提供了有效策略。

同年，日本筑波科学材料研究所Hainey等[75]提出金-介质-金（MDM）超表面结构的量子阱红外光电探测器（QWIP）。该探测器采用“拼布式”多腔结构（双腔或四腔）实现宽带吸收与响应增强。传统单腔结构仅能利用约60%的量子阱响应带宽，而双腔探测器在7.2 μm处达到最大响应度3.8 A/W（EQE=

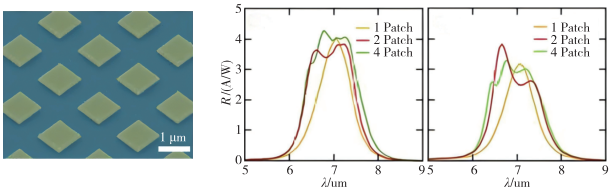
69%），四腔探测器在 6.8 μm 处的最大响应度达 4.3 A/W（*EQE*=78%），光响应带宽为 1.23 μm，几乎覆盖整个量子阱响应光谱（1.32 μm），较单腔探测器提升约 1.5 倍。该研究采用不刻蚀的连续 QWIP 层结合可自由排列的多尺寸贴片拼图，成功将等离子体腔共振的高效光捕获能力与共振光子分选的波长多路复用能力相结合，证明了基于不刻蚀设计的贴片拼图超表面是突破传统探测器带宽限制、实现高性能宽带红外探测的有效途径。

2023 年，台湾清华大学刘昌华等[76]报道黑磷（BP）与金纳米圆盘等离激元超表面耦合的中红外光电探测器，其兼具高响应度与快速响应性能。该器件利用金纳米圆盘超表面产生的等离激元共振，与 BP 薄片集成时引发的福斯特效应（FRET 共振能量转移）形成协同机制，增强了光与黑磷的相互作用效率。在 3.7 μm 波长、−0.7 V 偏压、8.55 μW 入射功率条件下，器件响应度高达 495.85 mA/W（*EQE*=16.61%），相较于未集成超表面的 BP 探测器提升了约 4 倍。响应速度达到纳秒级（上升时间为 64 ns，下降时间为 167 ns），操作频率超过 10 MHz，实现了高灵敏度与高速响应的协同优化。

金属与介质复合超表面的性能提升效果显著优于单一金属或介质超表面（如图 4 所示），其核心优势在于兼顾局域场增强与低损耗特性，已成为中波红外探测器的优选结构方案。



（a）金膜与硅阵列柱组成的超表面结构以及其相较于单一阵列柱、金薄膜或无超表面结构的探测器的响应度对比[74]



（b）由金方形贴片、二氧化硅层以及底层金反射层组成的 MDM 超表面结构示意图与其响应度测试结果[75]

图 4　金属与介质结合的超表面结构及其性能测试参数

综上所述，超表面结构通过光调制可大幅提升各工作波段光电探测器的性能，如表 1。可以看出，其核心作用是通过光场局域增强解决材料本征吸收率低的问题，改善硅基、锗基等材料在红外波段吸收性能急剧下降的现象[77-79]，进而在优化探测器暗电流、噪声、响应速度等参数的同时，保证高响应度与高量子效率。由图 4 可知，金属与介质复合制备的超表面结构，在实际实验中的性能提升效果显著优于传统单一金属或介质超表面。

表 1　不同类型超表面光电探测器性能对比

材料与器件结构	增益原理	性能对比
MCA 金刚石超表面	等离子体共振与多极偶极场促进载流子分离双重机制	光电流提升 10^8 数量级，在 270 nm 处产生额外响应峰（0.083 A/W）
金纳米柱超表面	局域表面等离激元共振	日盲波段吸收率从极低提升到 92%，218 nm 处峰值吸收率达 98%
杂化有机-无机钙钛矿（HOIP）纳米圆盘超表面	Mie 共振	300～800 nm 吸收率较纯薄膜提升 90%，光电流增强约 10 倍，响应速度优于多数报道的平面型光电探测器
SU-8 光刻胶纳米柱超表面	Mie 共振	比探测率提升 1 400%，外量子效率提升 900%，响应度提升 750%
铌酸锂纳米孔	导模共振	与单膜相比，光电流提升约 25 倍，与非共振结构相比光电流和响应度均提升约 2.5 倍
硅纳米孔阵列	磁偶极子共振	吸收率提升 30%
锗纳米圆盘	磁偶极子共振	响应度在整个工作波段均显著提高（1 000 nm 处为 3 倍，1 550 nm 处接近 100 倍）
金属（金）-介质（硅）混合孔阵列超表面	等离激元共振与瑞利异常衍射增强协同增强	响应度提升 15 倍，约 0.45 A/W
金属-介质-金属方形贴片腔超表面	金属-介质-金属共振腔的场局域化效应	响应度为 3.9 A/W，提升约 18%
金纳米圆盘	等离激元共振	响应度从 121 mA/W 提升到 495 mA/W，外量子效率提升 4 倍

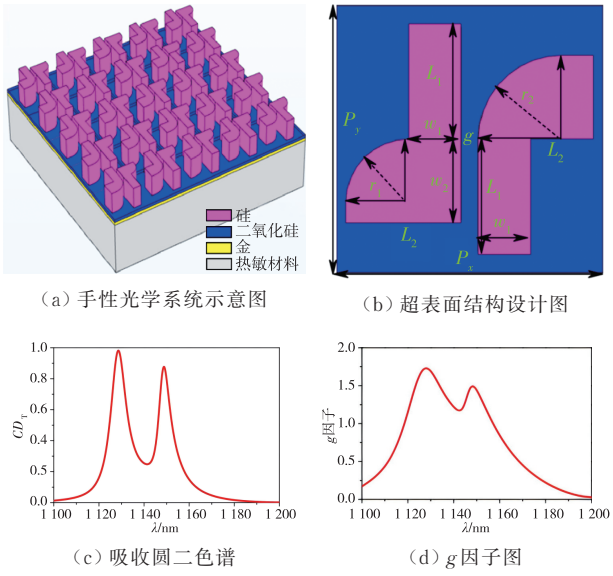
3　偏振敏感型超表面光电探测器

3.1　单一圆偏振光检测

单一圆偏振光检测是偏振探测的基础，在 chiral 物质检测、光学活性测量等领域不可或缺。这类器件的核心是实现对左旋圆偏振光（LCP）或右旋圆偏振光（RCP）的选择性响应，关键性能指标包括圆二色性（*CD*）、消光比（*ER*）及 *g* 因子。

2024 年，北京化工大学童丽课题组[80]提出基于圆角 L 型手性硅超表面的双波段近红外光电探测

器，工作波长为1 129 nm与1 148 nm，展现出优异的手性选择性。该结构在RCP照射下实现双波段完美吸收（吸收率大于90%），而在LCP下几乎全反射，圆二色性*CD*达0.9，*g*因子高达1.7。其结构与性能测试如图5所示，为高选择性圆偏振光检测提供了高效方案。



（a）手性光学系统示意图　（b）超表面结构设计图

（c）吸收圆二色谱　（d）*g*因子图

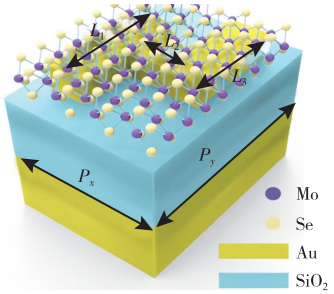
图5　圆角L手性硅超表面探测器结构示意图与性能测试参数[80]

多数手性超表面存在带宽窄（$\Delta\lambda/\lambda<10\%$）的问题，难以满足宽谱应用需求。2025年，湖南大学任浩然课题组[81]提出梯度超表面接触的InSe光电探测器，实现500～1 100 nm宽带、零偏压、自驱动的圆偏振光高效识别。器件通过金电极上的正交纳米狭缝结构激发CPL选择性表面等离激元，形成非对称电势分布，诱导方向性光生电流，理论消光比接近无限，实验*ER*约为42 dB；对线性偏振不敏感，具备良好的偏振免疫性，响应度达0.19 A/W，响应时间约为320～425 μs，为宽谱圆偏振光检测器件的研发提供了新思路。

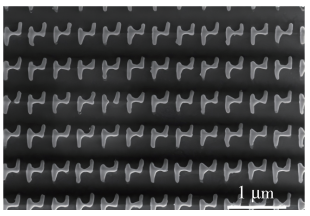
3.2　双偏振检测

双偏振检测可同步获取两种正交偏振分量（如LCP/RCP与线偏振光LPL）的信息，相比单一偏振检测能提取更丰富的光场矢量信息。这类器件需同时实现对不同偏振态的高选择性响应，对超表面的结构设计与光场调控能力提出了更高要求。

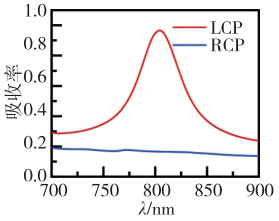
2024年，中国科学院物理研究所黄鑫课题组[82]提出可见光波段多偏振敏感光电探测器，通过单层$MoSe_2$与H型等离激元超表面的集成，借助结构手性和各向异性，实现对CPL和LPL的同时敏感探测，器件结构及性能如图6。H型等离激元超表面由三根不同尺寸（155 nm，50 nm和135 nm）的金纳米棒构成，在810 nm光照射下（结合液晶与等离子体效应），器件的*CD*为0.35，对LCP的峰值吸收率接近1，对RCP的吸收率不足0.2；在633 nm LPL照射下，LCP对应的响应度为10.5 μA/W，RCP对应的响应度为5 μA/W（测试条件：810 nm辅助光，入射功率0.19 mW），实现了两种偏振态的同步区分。



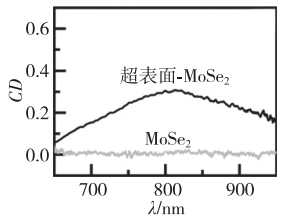
（a）等离子体变表面与单层$MoSe_2$整合形成的杂化结构示意图



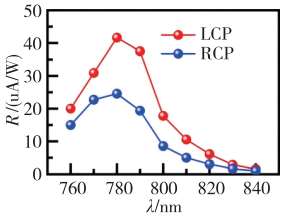
（b）等离子纳米结构的SEM图



（c）模拟等离子体超表面在LCP和RCP光照下的吸收光谱



（d）裸$MoSe_2$和$MoSe_2$耦合等离子体准表面的模拟光学CD光谱



（e）不同波长LCP和RCP光照下的光响应度

图6　金等离子体超表面与单层$MoSe_2$混合结构多偏振敏感光电探测器器件结构与性能测试参数[82]

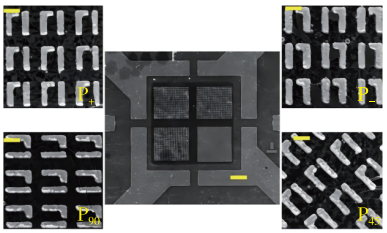
2025年，武汉理工大学贾博文课题组[83]提出黑磷（BP）与$Ge_2Sb_2Te_5$（GST225）相变材料集成的动态可调多偏振敏感中红外探测器。该器件采用手性金等离子体超表面结构，通过调控GST225的结晶度和金属结构参数，实现对LPL与CPL的高效选择性吸收。模拟结果显示，器件在3.41～4.82 μm范围内可实现可调吸收峰，*CD*与线二色性（*LD*）分

别超过 0.4 和 0.42；BP 层在不同偏振光照射下的光电流响应差异显著，LCP，RCP，Lx 及 Ly 四种状态均可有效区分，g 因子分别为 0.68（CPL）和 1.16（LPL），且在 0°～60°入射角范围内保持稳定响应，为动态可调偏振探测提供了新范式。

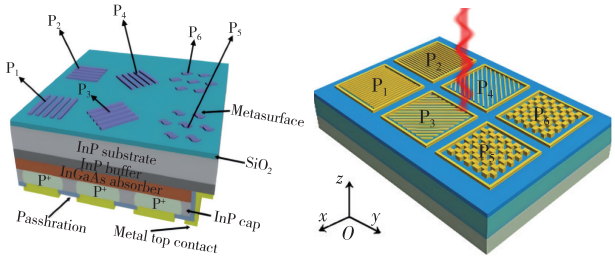
当前双偏振检测器件的主要瓶颈在于响应度偏低，影响实际应用效果。未来需将超表面的光路调控与器件异质结增益更好地结合，实现高性能与多功能的集成优化。

3.3　全斯托克斯偏振检测

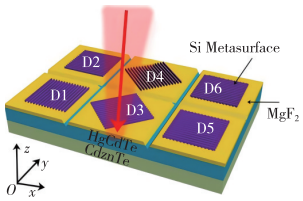
全斯托克斯偏振检测通过同时测量 S_0（光强）、S_1（水平/垂直线性偏振差）、S_2（45°或－45°线性偏振差）、S_3（圆偏振差）四个斯托克斯参量，可完整表征光场的偏振特性，是偏振探测的最高形式。这类器件的超表面单元通常由四种或六种不同几何手性及各向异性的图案组成，通过多像素阵列实现全参量测量，如图 7 所示。



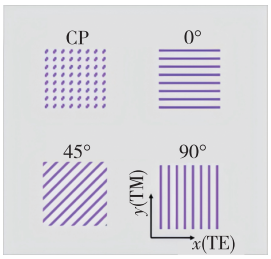
（a）石墨烯基 Cr/Au 等离子体超表面 SEM 图[84]



（b）InGaAs-InP 基六像素超表面结构[85-86]



（c）基于六像素硅超表面的碲镉汞长波红外光电探测器的结构示意图[87]



（d）基于二氧化钛超表面四像素单元结构图[88]

图 7　全斯托克斯检测超表面结构示意图

2020 年，南京大学王军专课题组[84]提出基于手性等离激元超表面的全斯托克斯近红外偏振探测器，工作波长为 1 550 nm。该器件将四种不同几何手性与取向的 Au/Cr 超表面结构与石墨烯-硅光电探测器集成，构成四像素单片偏振仪。通过 LSPR 效应，器件对 LCP/RCP 及不同方向线偏振光表现出显著的光电流差异，实验测得 CD 约为 0.3，线偏振对比度较无超表面结构器件提升达 6 倍，实现了全斯托克斯参量的同步测量。

2023 年，中国科学院半导体研究所宋国锋课题组[85]提出六方晶格硅（Si）手性超表面的 InGaAs/InP 全斯托克斯偏振光电探测器，偏振检测性能更为优异。该器件通过两个错位镜像等腰梯形硅块构成超表面结构，激发法布里-珀罗（FP）腔模，在 RCP 和 LCP 下表现出不同的多极子响应（RCP 由电四极子和磁四极子共同调控，LCP 主要由磁四极子控制）。在 1 550 nm 波长下，LCP 和 RCP 的 EQE 分别为 0.785 和 0.018，消光比达 30∶1，圆偏振二色性高达 78%；器件集成六个像素单元（0°，45°，90°及－45°线偏及左右圆偏），线偏和圆偏测量误差分别小于 0.01 和 0.08，测量精度显著提升。

2024 年，该团队[86]提出并仿真验证了一种集成式全斯托克斯偏振探测器，器件结构设计为典型的 PIN 型结构，自上而下由 350 nm 位错双金棒超表面、800 nm p 型 InP 接触层、3 000 nm InGaAs 吸收层、500 nm n 型 InP 接触层以及 InP 衬底组成。两种位错双金棒超表面结构用于测试 1 550 nm 的 RCP 和 LCP，CP 光探测器的吸收 CD 为 0.29，消光比为 21∶1。此外，设计了四种栅型结构用于测量 LPL，LP 光探测器的 LD 和 ER 分别为 0.85 和 80∶1。

2025 年，该团队[87]针对 HgCdTe 探测器无法区分光子偏振态的问题，提出硅超表面集成的 HgCdTe 长波红外全偏振光电探测器，工作波长为 9.6 μm。该器件采用六种不同结构的超表面像素，仿真结果显示，圆偏探测器在 9.6 μm 处，对 LCP 吸收接近 0.7，RCP 吸收接近 0，圆偏消光比（$CPER$）高达 19 dB；线偏探测器在 9.68 μm 处的线偏消光比（$LPER$）达 25.5 dB；通过优化硅层厚度（h ＝4.4 μm），引入偏振品质因子（PQF）综合评估线偏与圆偏性能，实现最佳偏振选择能力。

2025 年，上海大学赵兴岩课题组[88]提出基于 TiO_2 介质超表面的高性能全斯托克斯光电探测器，适用于可见至近红外波段（635～850 nm）。TiO_2 具有高折射率和低吸收损耗的优势，器件采用四像素结构（三个不同方向线偏振滤波器和一个圆偏振滤

波器),通过TiO_2纳米线光栅与手性超表面实现偏振选择性透过。在780 nm波长下实现约18%的CD,成功重构出入射光的完整偏振态(S_1,S_2及S_3),平均测量误差分别为13.8%,19.4%和17.9%,其结构示意图如图7(e)所示。

对比不同研究可以发现,六像素结构的测量精度显著优于四像素,其核心原因在于六像素通过冗余设计降低了像素非均匀性误差和随机噪声影响,能更全面地覆盖偏振态分量;材料选择方面,介质超表面的损耗更低、透射效率更高,但对图案设计和工艺加工的要求更为严苛。当前,全斯托克斯偏振检测器件仍面临损耗偏高、响应度与偏振分辨能力有待提升、工艺难度较大等问题,需在材料创新与结构优化方面持续突破。

4 总结与展望

尽管超表面光电探测器已取得显著进展,但仍面临一系列亟待解决的问题。在损耗控制方面,金属超表面的欧姆损耗与介质超表面的散射损耗限制了器件的响应度与探测带宽,特别是在中红外及更长波段,损耗问题更为突出。在多功能集成方面,目前的研究难点仍然是如何实现高响应度、快响应速度、宽光谱响应和偏振检测等功能的协同优化。此外,超表面与探测器的深度集成(如光路调控和载流子输运的协同设计)尚未得到充分实现。在宽波段适配方面,现有器件多针对特定波段优化,宽光谱(如紫外-红外)兼容的超表面光电探测器仍较少,不同波段的共振模式切换与兼容设计难度较大。在工艺与稳定性方面,纳米级结构的制备精度与一致性难以控制,影响批量生产,且在复杂环境(如高温、高湿)下的稳定性有待提升,限制工程化应用。

针对上述挑战,未来的研究应聚焦这几个方面。材料创新方面,开发低损耗、高稳定性、CMOS兼容的新型材料体系,如二维材料/介质复合结构、过渡金属氮化物及相变材料等;探索动态可调材料(如GST和VO_2)与超表面的集成,实现响应波段与偏振检测模式的主动调控。结构设计方面,开发梯度超表面、双曲超表面、准BIC超表面等新型结构,实现宽光谱、高Q值、低损耗的光场调控;将超表面的增益效应与探测器的内增益机制(如雪崩倍增、热释电效应)相结合,实现响应度的指数级提升。功能拓展方面,推动超表面光电探测器向多维度集成发展,如光谱-偏振-成像一体化探测;探索在太赫兹等波段的应用,拓展光电探测的边界。工艺与系统集成方面,发展高精度、低成本的大面积制备技术,提升批量生产能力;加强超表面与CMOS读出电路的单片集成,实现微型化、智能化的探测系统。

参考文献:

[1] Chetia A, Bera J, Betal A, et al. A brief review on photodetector performance based on zero dimensional and two dimensional materials and their hybrid structures[J]. Materials Today Communications, 2022, 30: 103224.

[2] Liu X, Yang X, Tang Q, et al. Application and prospect of 2D materials in photodetectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(37): 373002.

[3] Fang W, Li Q, Li J, et al. Deep ultraviolet photodetector: materials and devices[J]. Crystals, 2023, 13(6): 915.

[4] Shabbir H, Wojnicki M. Recent progress of non-cadmium and organic quantum dots for optoelectronic applications with a focus on photodetector devices[J]. Electronics, 2023, 12(6): 1327.

[5] Cai X, Wang S, Peng L M. Recent progress of photodetector based on carbon nanotube film and application in optoelectronic integration[J]. Nano Research Energy, 2023, 2: e9120058.

[6] Qin Y, Long S, Dong H, et al. Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(1): 018501.

[7] Gedda M, Song H, Pininti A R, et al. High-speed, self-powered 2D-perovskite photodetectors with exceptional ambient stability enabled by planar nanocavity engineering[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2025, 162: 100885.

[8] Lao Y F, Unil Perera A G, Li L H, et al. Tunable hot-carrier photodetection beyond the bandgap spectral limit[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 412-418.

[9] Johlen D, Klose P, Renner H, et al. Fiber Fabry-Perot interferometer with mode-converting Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(11): 1575-1582.

[10] Viana C, Tegegne Z G, Nanni J, et al. Vertical optical coupling structure based on polymer for small size and high-speed photodetectors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(21): 1886-1889.

[11] Yu W K, Yang Y, Liu J R, et al. Secondary complementary balancing compressive imaging with a free-space balanced amplified photodetector[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3801.

[12] Lu X, Li J, Zhang Y, et al. Template-confined oriented perovskite nanowire arrays enable polarization detection and imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(19): 24976-24986.

[13] Che M, Wang B, Zhao X, et al. $PdSe_2$/2H-$MoTe_2$ heterojunction self-powered photodetector: broadband

photodetection and linear/circular polarization capability[J]. ACS Nano, 2024, 18(44): 30884-30895.

[14] Long H, Xiong T, Hu J, et al. Solar-blind ultraviolet anisotropic polarization detection by β-Ga_2O_3 based Schottky photodiodes[J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(7): 1153-1156.

[15] Ye P, Xiao H, Zhu Q, et al. Si-CMOS-compatible 2D PtSe2-based self-driven photodetector with ultrahigh responsivity and specific detectivity[J]. Science China Materials, 2023, 66(1): 193-201.

[16] Guan R, Xu H, Lou Z, et al. Design and development of metasurface materials for enhancing photodetector properties[J]. Advanced Science, 2024, 11(34): 2402530.

[17] Zhao X, Lou T, Peng Y, et al. Metasurface-based photodetectors: pursuing superior performance and multifunctionality[J]. ACS Photonics, 2025, 12(8): 4096-4118.

[18] Wang Y M, Fan F, Zhao H J, et al. Terahertz structured deep-subwavelength plasmonic grating metasurface for manipulating polarization-dependent coupling response[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(23): 235101.

[19] Li S, Chen C, Wang G, et al. Metasurface polarization optics: phase manipulation for arbitrary polarization conversion condition[J]. Physical Review Letters, 2025, 134(2): 023803.

[20] Yang Y, Jing L, Zheng B, et al. Full-polarization 3D metasurface cloak with preserved amplitude and phase[J]. Advanced Materials, 2016, 28(32): 6866-6871.

[21] Lor C, Phon R, Lee M, et al. Multi-functional thermal-mechanical anisotropic metasurface with shape memory alloy actuators[J]. Materials & Design, 2022, 216: 110569.

[22] Jiang X, Fan W, Qin C, et al. Ultra-broadband polarization conversion metasurface with high transmission for efficient multi-functional wavefront manipulation in the terahertz range[J]. Nanomaterials, 2021, 11(11): 2895.

[23] Ling Y, Huang L, Hong W, et al. Polarization-switchable and wavelength-controllable multi-functional metasurface for focusing and surface-plasmon-polariton wave excitation[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29812-29821.

[24] Bian C, Zhou D, Zhang D, et al. Multifunctional folded transmitarray antenna (MFTA) with independent control of beam and polarization using reconfigurable metasurface[J]. Advanced Materials Technologies, 2024, 9(3): 2301774.

[25] 初光辉, 杨国皓, 刘天宏, 等. 用于雪崩光电探测器响应度增强的超透镜设计与仿真[J]. 发光学报, 2023, 44(12): 2250-2257.
Chu Guanghui, Yang Guohao, Liu Tianhong, et al. Design and simulation of metalens for enhanced responsivity of avalanche photodetectors[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2023, 44(12): 2250-2257.

[26] Liu J, Yang Q, Shou Y, et al. Metasurface-assisted quantum nonlocal weak-measurement microscopy[J]. Physical Review Letters, 2024, 132(4): 043601.

[27] Kim T, Kwak J, Roh Y, et al. Spectroscopic analysis of live cancer cell microenvironment with terahertz metasurface biosensing platform[C]//2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2024: 1-2.

[28] Chen K, Ji J, Li X, et al. Frequency modulated continuous wave LiDAR with expanded field-of-view based on polarization-splitting metasurface[J]. Nanophotonics, 2025, 14(17): 2901-2908.

[29] Lin Y, Zhang S. Recent advanced photodetectors coupling optical structure[J]. Photonics, 2025, 12(11): 1096.

[30] 付博妍, 毕千惠, 郑诗雨, 等. 基于多维光场调控的超构表面先进成像与显示[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 1-23.
Fu Boyan, Bi Qianhui, Zheng Shiyu, et al. Advanced metasurface imaging and display based on multidimensional light field manipulation[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 1-23.

[31] Ding F, Yang Y, Deshpande R A, et al. A review of gap-surface plasmon metasurfaces: fundamentals and applications[J]. Nanophotonics, 2018, 7(6): 1129-1156.

[32] Li D, Wu X, Chen Z, et al. Surface-enhanced spectroscopy technology based on metamaterials[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2025, 11: 60.

[33] Wang C, Cui T, Liu Z, et al. Molybdenum truncated cone arrays with localized surface plasmon resonance for surface-enhanced Raman scattering application[J]. Photonics, 2024, 11(10): 950.

[34] Mpofu K T, Ombinda-Lemboumba S, Mthunzi-Kufa P. Classical and quantum surface plasmon resonance biosensing[J]. International Journal of Optics, 2023, 2023(1): 5538161.

[35] Li G C, Zhang Q, Maier S A, et al. Plasmonic particle-on-film nanocavities: a versatile platform for plasmon-enhanced spectroscopy and photochemistry[J]. Nanophotonics, 2017, 7(12): 1865-1889.

[36] Liu C, Zhang H, Wang Q, et al. Efficient gold recovery from low concentrated Au $(S_2O_3)_2$ 3-solution through enhanced photocatalysis *via* photothermal and surface plasmon resonance assistance on MoS_2/MXene/Ag[J]. Desalination, 2024, 584: 117733.

[37] Li W, Cheng S, Zhang H, et al. Multi-functional metasurface: ultra-wideband/multi-band absorption switching by adjusting guided-mode resonance and local surface plasmon resonance effects[J]. Communications in Theoretical Physics, 2024, 76(6): 065701.

[38] Wekalao J, Patel S K, U A K, et al. Detection of proteins in a surface plasmon resonance biosensor based on hybrid metasurface architecture and behaviour prediction using random forest regression[J]. Plasmonics, 2025, 20(7):

5165-5185.

[39] Zhang C, Hu J, Dong Y, et al. High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 583.

[40] Nanda B P, Rani P, Paul P, et al. Recent trends and impact of localized surface plasmon resonance (LSPR) and surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) in modern analysis [J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2024, 14(11): 100959.

[41] 相春平, 袁占生, 刘 璟, 等. 表面等离子激元与F-P共振耦合平衡钙钛矿太阳能电池有源层内载流子产生速率[J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1749-1756.
Xiang Chunping, Yuan Zhansheng, Liu Jing, et al. Surface plasmon polaritons and F-P resonance coupled modes balance the generation rate of charge carriers of perovskite solar cells [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(12): 1749-1756.

[42] 苏宛然, 冯 琳, 石林林, 等. 表面等离激元增强型光电探测器研究进展[J]. 发光学报, 2021, 42(7): 1014-1028.
Su Wanran, Feng Lin, Shi Linlin, et al. Research progress in surface plasmon enhanced photodetectors[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(7): 1014-1028.

[43] 曹修东, 张会红, 田 野, 等. 基于表面等离子体共振效应的荧光太阳集光器制备及其性能[J]. 发光学报, 2022, 43(3): 396-403.
Cao Xiudong, Zhang Huihong, Tian Ye, et al. Preparation and performance of luminescent solar concentrator based on surface plasmon resonance effect[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(3): 396-403.

[44] Dorodnyy A, Smajic J, Leuthold J. Mie scattering for photonic devices [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(9): 2300055.

[45] Wu M, Ha S T, Shendre S, et al. Room-temperature lasing in colloidal nanoplatelets *via* Mie-resonant bound states in the continuum[J]. Nano Letters, 2020, 20(8): 6005-6011.

[46] Li B, Yao J, Zhu H, et al. Asymmetric excitations of toroidal dipole resonance and the magnetic dipole quasi-bound state in the continuum in an all-dielectric metasurface[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(7): 2359.

[47] Fang J, Wang D, DeVault C, et al. Enhanced graphene photodetector with fractal metasurface[C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016: 1-2.

[48] Masoudian Saadabad R, Pauly C, Herschbach N, et al. Highly efficient near-infrared detector based on optically resonant dielectric nanodisks[J]. Nanomaterials, 2021, 11(2): 428.

[49] Tong J, Suo F, Tobing L Y M, et al. Rotated fourfold U-shape metasurface for polarization-insensitive strong enhancement of mid-infrared photodetection[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4225.

[50] Panchenko E, Cadusch J J, James T D, et al. Plasmonic metasurface-enabled differential photodetectors for broadband optical polarization characterization[J]. ACS Photonics, 2016, 3(10): 1833-1839.

[51] Yang L, Yang D, Guo D, et al. Visible-blind deep ultraviolet photomultiplication organic photodetectors with ultrahigh gain for UVB and UVC light detection[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(43): 2206993.

[52] Xie C, Lu X T, Tong X W, et al. Recent progress in solar-blind deep-ultraviolet photodetectors based on inorganic ultrawide bandgap semiconductors[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(9): 1806006.

[53] Hao J, Li L, Gao P, et al. Deep ultraviolet detectors based on wide bandgap semiconductors: a review[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2023, 25(4): 81.

[54] Cai Q, Zhi T, You H, et al. Ultrahigh sensitivity solar-blind UV detection *via* multistage-concentric-annulus architecture metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(2): 2301333.

[55] 屈珉敏, 李旺旺. 用于日盲光电探测器的超表面吸收器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(7): 144-148.
Qu Minmin, Li Wangwang. Metasurface absorber design for solar-blind photodetectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(7): 144-148.

[56] He J, Li C Y, Qi D X, et al. Improving photoelectric conversion with broadband perovskite metasurface[J]. Nano Letters, 2022, 22(16): 6655-6663.

[57] Zhao H, Wang W, Ding H, et al. Dielectric metasurface enhanced performance in multilayer WS_2 photodetector[J]. Science China Information Sciences, 2025, 68(7): 179403.

[58] Jin C, Qu L, Wang C, et al. Metasurface-enhanced photodetection in lithium niobate[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(32): e01191.

[59] Qin F, Ding L, Zhang L, et al. Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light[J]. Science Advances, 2016, 2: e1501168.

[60] Li P. Infrared hyperbolic metasurface based on nanostructured van der Waals materials [C]//International Photonics and OptoElectronics Meeting, 2019: OTh3B. 3.

[61] Cai B, Wu L, Zhu X, et al. Ultra-broadband and wide-angle plasmonic light absorber based on all-dielectric gallium arsenide (GaAs) metasurface in visible and near-infrared region[J]. Results in Physics, 2024, 58: 107509.

[62] Cao F, Liu L, Li L. Short-wave infrared photodetector[J]. Materials Today, 2023, 62: 327-349.

[63] Han Z, Wang F, Sun J, et al. Ultrathin twisted stacked gap-plasmon metasurface with giant and tunable shortwave infrared chirality[J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(23): 2301022.

[64] Shi L, Lu L, Chen W, et al. Si-based polarizer and 1-bit phase-controlled non-polarizing beam splitter-based integrated metasurface for extended shortwave infrared[J]. Nanomaterials,

2023, 13(18): 2592.

[65] Tao C, Zhu H, Zhang Y, et al. Shortwave infrared single-pixel spectral imaging based on a GSST phase-change metasurface [J]. Optics Express, 2022, 30(19): 33697-33707.

[66] Yu H, Xiong Q, Wang H, et al. Near-infrared free carrier absorption enhancement of heavily doped silicon in all-dielectric metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(13): 134101.

[67] Yezekyan T, Zenin V A, Thomaschewski M, et al. Germanium metasurface assisted broadband detectors[J]. Nanophotonics, 2023, 12(12): 2171-2177.

[68] Xie Y, He J, Li Z, et al. High-performance broadband silicon-based photodetector enabled by biomimetic asymmetric metasurface[J]. IEEE Electron Device Letters, 2025, 46(10): 1809-1812.

[69] Wijaya T J, Higashitarumizu N, Wang S, et al. Mechanically flexible mid-wave infrared imagers using black phosphorus ink films[J]. Nature Communications, 2025, 16: 5972.

[70] Liu Z, Wang B, Wang S, et al. Mid-infrared high performance dual-Fano resonances based on all-dielectric metasurface for refractive index and gas sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 177: 111140.

[71] Liu X, Ma R, Liu J, et al. Metasurface-assisted amorphous germanium-tin waveguide bolometer for mid-infrared photodetection[J]. Optics Express, 2024, 32(3): 3501-3511.

[72] Liu W, Wan Y, Yu H, et al. Miniature snapshot mid-infrared spectrometer based on metal-insulator-metal metasurface[J]. Journal of Optics, 2024, 26(8): 085003.

[73] Guo K, Li X, Ai H, et al. Tunable oriented mid-infrared wave based on metasurface with phase change material of GST [J]. Results in Physics, 2022, 34: 105269.

[74] Yakimov A, Kirienko V, Bloshkin A, et al. Quantum dot based mid-infrared photodetector enhanced by a hybrid metal-dielectric optical antenna[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(33): 335105.

[75] Hainey M F, Mano T, Kasaya T, et al. Patchwork metasurface quantum well photodetectors with broadened photoresponse[J]. Optics Express, 2021, 29(1): 59.

[76] Yadav S N S, Chen P L, Liu C H, et al. Plasmonic metasurface integrated black phosphorus-based mid-infrared photodetector with high responsivity and speed[J]. Advanced Materials Interfaces, 2023, 10(10): 2202403.

[77] Zhang Y, Wu Z, Xia J, et al. Infrared metasurface absorber based on silicon-based CMOS process[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32937-32947.

[78] Alkorjia O, Koppula A, Abdullah A, et al. Metasurface-enabled uncooled silicon germanium oxide infrared microbolometers for long-wave infrared detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(15): 16616-16624.

[79] Tian J, Luo H, Li Q, et al. Near-infrared super-absorbing all-dielectric metasurface based on single-layer germanium nanostructures[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(9): 1800076.

[80] Chen Z, Ma X, Zhu B, et al. Dual-band photodetector based on a large circular dichroism [J]. Optics Express, 2024, 32(26): 46969.

[81] He C, Tang Z, Wang C, et al. Gradient-metasurface-contact photodetector for visible-to-near-infrared spin light[J]. Advanced Materials, 2025, 37(17): 2418405.

[82] Bai Q, Huang X, Du S, et al. Multiple-polarization-sensitive photodetector Based on a plasmonic metasurface[J]. Nanoscale, 2024, 16(18): 8907-8914.

[83] Kuang H Z, Wang S Y, University W, et al. Dynamically tunable multiple-polarization-sensitive black phosphorus metasurface detector operating in the mid-infrared region[J]. Optics Express, 2025, 33(8): 16925.

[84] Li L, Wang J, Kang L, et al. Monolithic full-stokes near-infrared polarimetry with chiral plasmonic metasurface integrated graphene-silicon photodetector[J]. ACS Nano, 2020, 14(12): 16634-16642.

[85] Cheng B, Song G. Full-Stokes polarization photodetector based on the hexagonal lattice chiral metasurface[J]. Optics Express, 2023, 31(19): 30993-31004.

[86] Cheng B, Zou Y, Song G. Full-stokes polarization photodetector based on the chiral metasurface with the dislocated double gold rod configurations[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 174: 110531.

[87] Cheng B, Wang X, Zou Y, et al. Design of long-wave fully polarized HgCdTe photodetector based on silicon metasurface [J]. Micromachines, 2025, 16(8): 937.

[88] Yu W, Jiao Y, Zhang Y, et al. Full-stokes photodetector based on TiO_2 metasurface [J]. Advanced Materials Technologies, 2026, 11(1): e01413.

作者简介：

武靖翔(1999—)，男，吉林省长春市人，硕士研究生，主要从事超表面光电探测器方面的研究；

王云鹏(1985—)，男，吉林省长春市人，硕士生导师，副研究员，主要从事半导体材料激光修饰及飞秒超快光谱方向的研究。