动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250321001

基于水下无线光通信的蓝绿光探测器研究进展

李亚明[1]，董昱森[2]，杜晨曦[2]，李嘉欣[2]，李　冲[2*]

（1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所北京研发中心，北京 100041；2. 北京工业大学 信息科学技术学院，北京 100124）

摘　要： 水下无线光通信（UWOC）依赖高带宽、低延迟特性，广泛应用于海洋监测与勘探。蓝绿光（450～570 nm）因在水中吸收少、穿透强，成为其核心载波。随着通信需求提升，发展高速、高灵敏的蓝绿光探测器日趋重要。文章系统综述了蓝绿光通信探测器的研究进展，基于蓝绿光高效吸收的半导体材料种类和相应的高速探测器结构，将其分为三大类：基于能带调控的低维材料器件、基于表面场调控和横向电场的传统Si材料探测器和基于组分调节的GaN系材料探测器。然后，深入分析三类探测器的工作原理、发展现状、性能优势和核心挑战。最后，探讨了蓝绿光探测器在提升吸收效率、响应速度、灵敏度、稳定性及集成度方面面临的挑战，并展望了未来发展方向。

关键词： 光电探测器；蓝绿光探测；水下无线光通信

中图分类号： TN929.12　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0587－10

Research Progress on Blue-Green Light Detectors Based on Underwater Wireless Optical Communication

LI Yaming[1], DONG Yusen[2], DU Chenxi[2], LI Jiaxin[2], LI Chong[2]

（1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100041, CHN;
2. Faculty of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN）

Abstract: Underwater wireless optical communication (UWOC) is crucial in marine monitoring and resource exploration owing to its advantages, including high bandwidth and low latency. Blue-green light (450～570 nm) is the preferred carrier signal due to its minimal absorption attenuation coefficient and superior penetration in water. With the escalating demand for communication data volume and transmission distance, the development of high-speed and high-sensitivity blue-green light communication detectors has become essential. This review summarizes recent global advancements in blue-green light communication detectors. Based on the semiconductor materials that absorb blue-green light and the high-speed detector structures, these detectors can be classified into three categories: low-dimensional material devices utilizing bandgap engineering, traditional Si-based detectors leveraging surface field modulation and lateral electric fields, and GaN-series material detectors through compositional tuning. A critical analysis of the operational principles, development status,, advantages, and limitations of each category is conducted. Finally, the challenges of the blue-green photodetectors in enhancing absorption efficiency, response speed, sensitivity, stability, and integration are discussed, highlighting prospects for next-generation high-performance detectors in underwater communication systems.

Key words: photodetectors; blue-green light detection; UWOC

收稿日期：2025－03－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(62375008).

*通信作者：李　冲

1 引言

水下通信是海洋工程、资源勘探、环境监测和国防安全等领域的核心支撑技术之一。传统水下有线通信技术存在系统成本高、灵活性差、操作范围有限,以及线路易腐蚀等问题,相比之下,水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)因其有更远的传输距离、更高的传输带宽、更快的传输速率、更低的功耗、更安全的信息传递、更简单的链路设计和更低的成本,成为当前研究重点。UWOC利用光波作为信息载体,相较于声波、电磁波等无线通信载体,光波频率高、波长窄,可实现时变多通道传播,有效抑制多普勒展宽效应[1]。因此,UWOC在军事监视、环境勘测、海上勘探、气候监测、海洋研究、无缆水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、深海装备维护等场景具有迫切的应用需求,且在信息传输的通信场景中对UWOC也提出了迫切的应用需求[2]。然而,海洋中的海盐、有机物和浮游生物等对光信号有不同程度的吸收和散射损耗。研究表明,在可见光谱范围内,蓝绿光波段(450~570 nm)具有最小衰减系数和最强穿透能力,因此其成为UWOC的主要载波光[3]。利用蓝绿光的特性,UWOC有望能够实现点对点通信以及跨介质信息互联。

近年来,基于LED和激光LD的蓝绿光通信发射模块具有传输速率高、低功耗、体积小、成本低、抗电磁干扰等众多优点,水下通信发射端技术日趋成熟。然而,即使对于传输损耗最低的蓝绿光,其衰减系数也达到约0.4 dB/m,是光纤传输损耗的1×10^3倍。因此,高灵敏、高速响应和高稳定的蓝绿光光电探测器的开发成为提升UWOC系统性能的关键瓶颈。水下光传输的低损耗窗口的光子能量在2.17~2.76 eV之间[4],传统半导体材料,如Si, Ge, GaSb, InP, GaAs, InGaAsP等禁带宽度远小于蓝绿光光子能量,光吸收系数大,穿透深度小,表面态和重掺杂层造成光生电子-空穴对的复合几率高,器件蓝绿光的响应度较低;而GaN, AlGaN和SiC等材料禁带宽度大于3.2 eV,无法实现蓝绿光的本征高效吸收[5]。禁带宽度在蓝绿光光子范围内的半导体材料,如GaP(2.26 eV), AlAs(2.168 eV)等,能量无法覆盖蓝绿光全波段。禁带宽度略高于2.75 eV的半导体材料普遍是新型的组分合成材料,如Ga_2S_3[6],光吸收峰位于3.0 eV,蓝绿光波段的吸收效率为10%~40%,但是其合成材料不稳定,容易在空气中氧化,制备技术不成熟。因此,研究高响应、高灵敏、高速、低成本、高稳定性的水下蓝绿光通信探测器具有重大意义。

本文介绍了各类蓝绿光探测器发展现状和优缺点。基于吸收材料和器件结构将现有的蓝绿光探测器分为三大类:低维合成材料器件、传统Si材料探测器以及GaN系材料探测器。基于材料性能和工艺技术,分析了各类探测器的优缺点,讨论了各类探测器面临的挑战以及未来发展前景。

2 蓝绿光光电探测器

2.1 基于能带调控的低维半导体材料探测器

半导体二维(2D)层状材料可以通过控制层数来调控带隙,从而拓宽在光电子领域的应用。利用低维材料生长技术调控材料晶体结构,能够优化半导体的禁带宽度,进而实现对蓝绿光的高效吸收和探测。蓝绿光低维材料探测器主要有三种:

(1)纳米膜器件

典型蓝绿光纳米膜器件材料是层状金属硫族化物薄膜,该材料具有640 $cm^2/(V\cdot s)$的载流子迁移率,且易与互补金属氧化物半导体器件兼容,便于集成[7]。Nur课题组利用原子层沉积技术制备氧化铪(HfO_2)作为介电层和电荷俘获层,与多层MoS_2材料结合构成了蓝绿光薄膜探测器,器件结构如图1(a)所示。HfO_2通过氧空位固有的电荷捕获特性,捕获光生空穴载流子来增强光响应,将蓝光波段响应度增大到约10^6 A/W量级,实现大于10^9的光增益,但器件脉冲响应上升/下降时间仅为408 ms/682 ms[8]。张永哲课题组将高迁移率的石墨烯(Gr)与非零带隙金属硫化物MoS_2结合构成横向Gr-MoS_2肖特基探测器,器件在532 nm处正向偏压光响应达1.1×10^5 A/W@5 V,其瞬态响应时间和恢复时间分别为150 ms和15 s,在反向−5 V偏压下响应为12 A/W@532 nm,瞬态响应时间和恢复时间分别为100 ms和150 ms[9];杨树明课题组制备的双异质结单壁碳纳米管薄膜(SWCNT)/Gr/MoS_2薄膜柔性光电探测器如图1(b)所示[10]。该器件利用两个异质结的不对称性增加内置电场,加速载流子的分离,增强光吸收,在450 nm入射光下的响应度为17 A/W,响应时间和恢复时间分别为290和498 ms。随后,该团队又引入透明的薄绝缘铁磁性

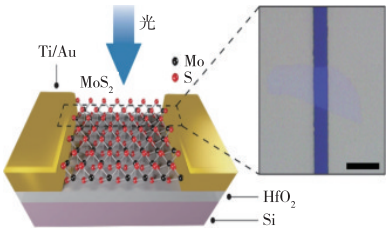
材料钆铁石榴石($Gd_3Fe_5O_{12}$,GdIG),进一步优化双异质结界面增加异质结之间的势垒高度,将器件暗电流降低一级,响应度提高至 47 A/W@450 nm,但瞬态响应时间和恢复时间分别降低至 623 和 628 ms[10]。

(2)纳米线器件

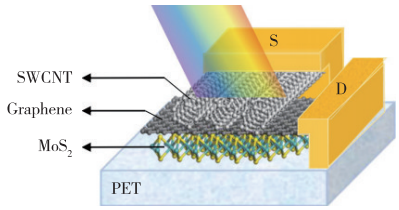
蓝绿光纳米线探测器普遍使用 ZnO 纳米材料,此材料具有宽带隙(3.37 eV)和高激子结合能(60 MeV)的优势,与钙钛矿 CsPbX3(X=Br,Cl,I)结合实现钝化,消除表面和晶界上的陷阱,以提高载流子传输效率。复旦大学方晓生课题组利用静电纺丝工艺实现 Ag 掺杂的 P 型 ZnO 纳米纤维,其摩尔比 Ag:Zn=1:10,与未掺杂的 ZnO 构成 PN 结,形成 ZnO 同质结纳米纤维阵列探测器,器件在可见光范围内透明度平均为 89%,开关比达 2.5×10^4@−1 V,优于未掺杂 ZnO 纳米纤维器件(开关比为 10^2@−1 V)[11]。随后该课题组利用管式炉蒸汽传输技术制备 SnO_2 毫米线/CsPbBr 复合材料,在 480 nm 光下响应度达 1.9 A/W@3 V,响应上升/下降时间为 0.03 ms/1.94 ms[12]。中国科学院大学李勇军课题组通过在硅衬底的 ZnO 纳米线上蒸发液相 CsPbBr 成核生长微晶,获得 CsPbBr/ZnO 异质结,器件光响应为 41.5 A/W@473 nm,量子效率为 1 086%,上升/衰减时间为 8 ms/10 ms[13]。此外,Chen 等利用 GaN 纳米线(NMs)设计了一种自供电 Cu@GaN-NW 网络的光电探测器如图 1(c)所示。该团队利用有机溶剂法合成 Cu 纳米线,并使用含 Ga 金属有机物和高温氮化技术形成 GaN 核壳,构建了具有内置电场的径向肖特基结,以促进电子转移和电荷分离。Cu NWs 网络为电子提供了一维传输通道,器件在 458 nm LED 照射下响应度达到 5.04 mA/W@458 nm,上升/衰减时间为 0.68 ms/1.43 ms[14]。

(3)杂化纳米结构器件

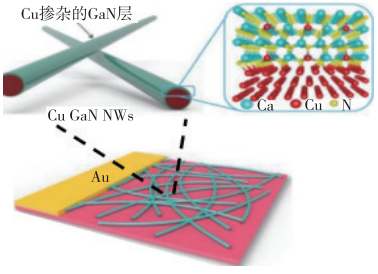
杂化纳米结构是利用量子点、纳米线和纳米薄膜多种量子结构相互结合,充分利用量子结构的优势构建的晶体结构。罗林宝课题组通过溶液转移法将 Au 纳米粒子(NP_S)和热蒸发法合成的 ZnTe 纳米柱(NW_S)结合制成具有表面等离子增强效应的 AuNPs@ZnTe NWs 结构,将 532 nm 波段的光响应提高到 5.11×10^3 A/W[15]。江唐课题组利用 PbS 胶体量子点(CQDs)敏化制备得到 SnS_2 纳米膜晶体管(FET)器件如图 1(d)所示,该器件在 400 nm 波段的光响应高达 10^4 A/W,−3 dB 带宽为 1×10^2 Hz。通过化学蒸汽法生长 SnS_2 单晶和微机械解离获得纳米薄片并在纳米薄膜上旋涂 PbS CQDs,利用胶体量子点的强吸收与二维 SnS_2 纳米片内载流子的快速循环之间的协同作用,制备的器件−3 dB 带宽为 10^2 Hz[16]。



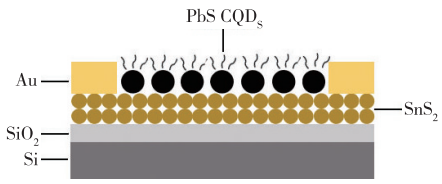
(a)基于 HfO_2 电荷捕获的多层 MoS_2 光电探测器[8]



(b)基于 SWCNT/Gr/MoS_2 双异质结的柔性光电探测器[10]



(c)Cu@GaN NWs 纳米线网络的光电探测器[14]



(d)SnS_2 纳米片/PbS CQDs 胶体量子点混合光电探测器[16]

图 1　基于能带调控的低维半导体材料探测器结构示意图

由上可知,纳米结构器件普遍采用低维材料构建器件结构,利用光电导效应实现光信号到电信号的转化,因此探测器的响应度普遍在 10^3 A/W 量级以上。然而,目前晶体生长技术还不能制备出高质量大面积单晶低维材料。二维材料的表面积和体积比较大,容易受到水蒸气和空气杂质的影响,晶

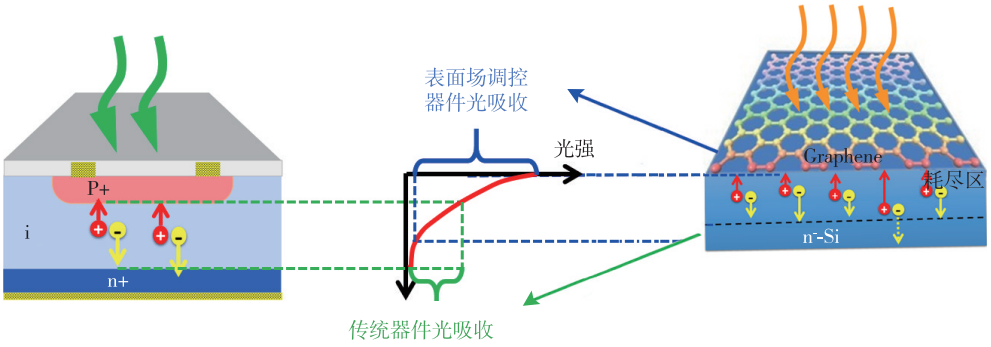
格结构的各类缺陷和不连续影响载流子输运速度，使低维材料器件最短的光响应速率停留在10^{-2} s量级[17]，响应频率低于1 kHz。此外，受到二维材料体积和态密度的限制，探测器的光响应的线性度和饱和性能相对较差。

2.2 基于传统Si材料蓝绿光探测器

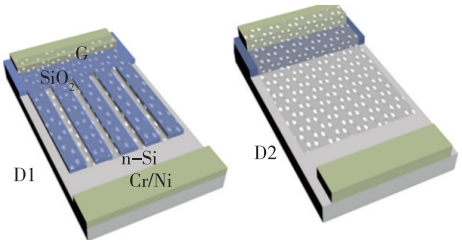
基于Si材料的蓝绿光探测器能大幅降低通信系统工业成本，并可与信息处理微电子电路实现单片集成。但Si材料对蓝绿光吸收系数较大，光穿透深度较浅，如图2(b)的红色曲线所示。传统Si光电探测器对蓝绿光的吸收集中在顶层重掺杂区[18]，重掺杂区光生载流子的迟豫时间极短，载流子复合作用严重，并且近表面重掺杂区内的光生载流子不能形成有效的光电流，导致器件的蓝绿光响应度低[19]，如图2(b)绿色曲线。解决该低响应度方法主要有两种：1)利用肖特基结实现近表面高收集场；2)利用横向场结构。

(1)利用二维导电材料形成近表面场肖特基探测器

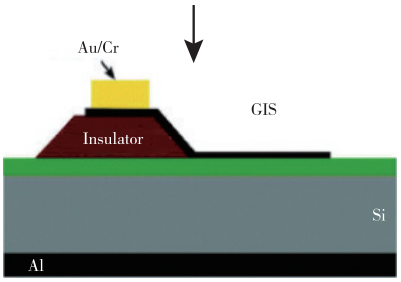
肖特基光电探测器通过半导体和金属之间形成半导体-金属结以构建肖特基势垒，该器件的漂移电场从表面开始并延伸到体硅深处，消除传统探测器顶层重掺杂区对蓝绿光响应度的削弱，光吸收效率如图2(b)蓝色曲线所示。将Gr，ITO等透明导电材料与Si直接接触形成肖特基结，可实现光吸收、载流子的收集和电传导[20]。Gr在室温下具有超高的载流子迁移率(15 000 $cm^2/V\cdot s$)、宽带吸收光谱和灵活的能带结构等，因此Si肖特基器件研究主要集中在Gr/Si结构器件。早期Gr/Si探测器的肖特基势垒高度为4.16 eV，暗电流约为10^{-7} A@−5 V[21]。经研究发现，Gr/Si界面存在大量的界面态，导致器件具有较高暗电流密度，从而限制光电探测器性能。因此，优化Gr/Si界面是Si基蓝绿光探测器研究的重点。



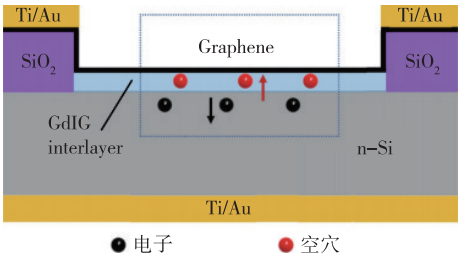
(a) Si基传统探测器的结构剖视图 (b) 两种结构随深度变化的光强曲线 (c) Si基Graphene肖特基器件示意图和载流子输运示意图



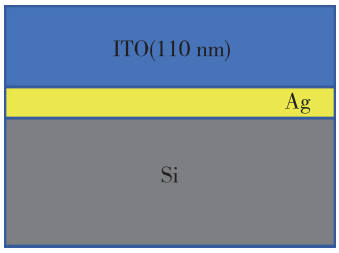
(d) 叉指图案化SiO_2/Si/石墨烯二极管结构D1，传统的Gr/Si二极管结构D2[22]



(e) Gr/GdIG/Si(GIS)肖特基二极管结构图[23]



(f) Gr/GdIG/Si光电探测器结构剖视图[24]



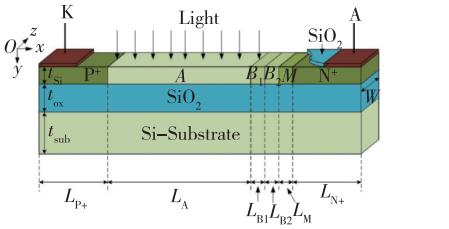
(g) ITO/Ag/n-Si肖特基光电探测器结构图[26]

图2 二维导电材料形成近表面场的肖特基探测器

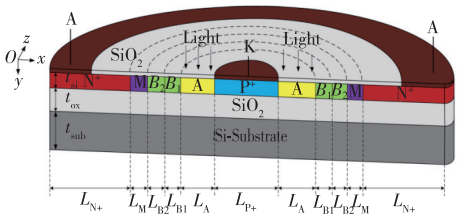
Riazimehr等利用叉指图案化SiO_2/Si结构提高肖特基势垒，降低界面态缺陷密度，如图3(d)所示。该器件将500 nm处的响应度提高到0.35 A/W，量子效率大于80%[22]。Selvi等利用天然氧化层提高界面势垒，所制备的石墨烯/绝缘体/硅(GIS)肖特基二极管，在400～950 nm波长范围内，量子效率能够达到60～70%，截止频率为35 kHz@468 nm[23]。杨树明课题组利用均匀高绝缘性的GdIG薄膜作为中间层制备出Gr/GdIG/Si肖特基器件如图2(e)所示。GdIG薄膜作为一种透明铁磁绝缘体，其介电常数高达11.9，可以有效增加金属-半导体界面的势垒高度，器件在－2 V偏置电压下器件暗电流降低至原来的54倍，响应度达0.9 A/W@633 nm[24]。该课题组还在Gr/Si肖特基界面处加入氧化石墨烯片(GO)，GO界面层可以有效抑制石墨烯/Si光电探测器的界面复合增强光响应，肖特基势垒高度从0.88 eV增加到0.91 eV，－2 V偏置下暗电流由9.9 μA/cm²下降到0.37 μA/cm²，光电流从37 mA/cm²增加到101 mA/cm²，响应度达0.65 A/W@633 nm[25]。此外，在金-半界面插入适当电子亲和势的薄层金属也能有效提高界面势垒高度，进而降低器件噪声和暗电流。王建元课题组制备的ITO/Ag/n-Si肖特基光电探测器相较于ITO/n-Si肖特基器件，势垒提高了0.32 eV，暗电流降低了2 300倍(～9.2 nA@－1 V)。因金属层的加入器件表面透光率由85%(ITO/n-Si)降低为55%(ITO/Ag—8 nm/n-Si)，响应度为0.2 A/W@500 nm[26]。然而透明电极面临高成本和脆性等问题，虽然可以采用背照技术来解决，但会增加器件处理和芯片封装的复杂性[27]。此外，器件在蓝绿光波段响应截止频率普遍低于兆赫兹量级。

(2)基于横向电场的Si雪崩探测器

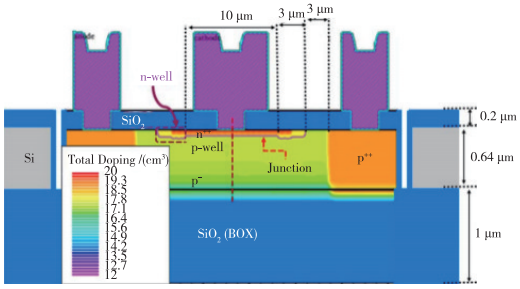
雪崩光电探测器(APD)利用载流子的雪崩倍增效应来放大光电信号以提高检测的灵敏度，调控PN结掺杂区域将载流子的漂移电场平行于入射面，实现近表面光生载流子的高效收集。谢海情课题组制备的横向电场Si雪崩光电探测器器件结构如图3(a)所示，该结构器件的光敏面长度L_A为1.5 μm，暗电流低至2.6 fA@－4 V，在0.001 W/cm²的400 nm光入射下响应度达160 A/W@8.2 V，器件发生雪崩倍增，其倍增系数约为229，带宽为10 GHz@－9.5 V，1 GHz@－9.2 V[28]。



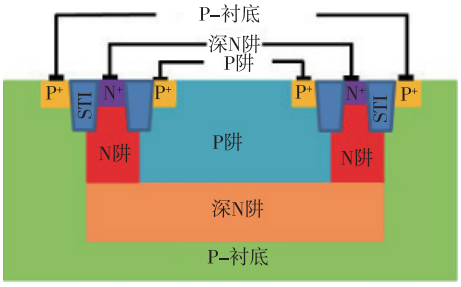
(a)水平雪崩器件结构剖视图[28]



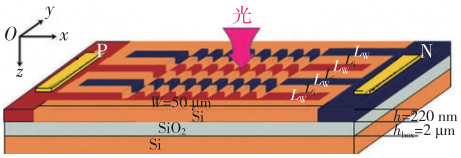
(b)环状雪崩探测器结构[29]



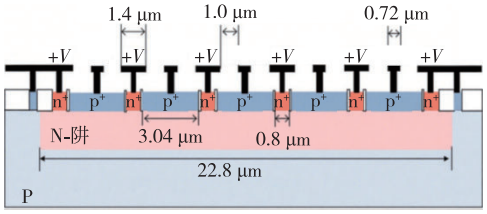
(c)基于n^{++}/p阱的APD二维结构[30]



(d) p/STI/n结构器件剖视图[31]



(e)垂直耦合型共面叉指高速探测器[32]



(f) p-MOS型CMOS-APD的横截面结构[33]

图3　基于横向电场的Si雪崩探测器

但横向结构吸收区宽度不仅决定了器件渡越时间，还决定了光吸收面积，因此造成器件带宽和响应度的矛盾。为解决这一问题，该团队设计出环形光敏面的环状雪崩探测器结构，如图3(b)所示，在相同大小的光敏面下研制的环状雪崩器件光敏面长度L_A减少为0.35 μm，缩小了载流子的渡越时间，器件暗电流为6.01 fA@－4 V，响应度提高为1236.9 A/W@8.11 V对应倍增系数为5 730，带宽为3.2 GHz@－9.2 V[29]。

横向电场的Si-APD器件结构能与成熟的CMOS工艺契合，此类器件能够与微电子电路单片集成，特别是CMOS工艺的阱扩散工艺，浅槽隔离(STI)技术以及SOI衬底技术，为横向场的Si-APD器件结构提供多种设计和可能。图3(c)所示为Alirezaei等制备的基于SOI衬底的n阱保护环n^{++}/p-well浅结雪崩探测器，超薄的顶层Si可以减少体泄漏电流和相关噪声，器件在400 nm波长下响应度为14.46 A/W@7.8 V，增益值为4.9，拥有93.88 %@400 nm的量子效率[30]。Atef课题组基于p型Si衬底采用40 nm CMOS标准工艺制造的表面p/STI/n结构器件如图3(d)所示，浅沟槽隔离STI可有效隔离P^+和N^+区防止过早击穿，深n阱可以拓宽空间电荷区宽度增加载流子寿命降低复合速率，器件在520 nm入射光实现2.04 A/W的响应度和1.4 GHz的3 dB带宽[31]。

表1总结了国际上几家代表性研究机构在Si-APD方面取得的最新成果，其中最高带宽(14.1 GHz@850 nm)是李冲课题组制备的叉指结构的硅光电探测器实现的，结构如图3(e)所示[32]。Iiyama等采用标准CMOS工艺制备的象限CMOS-APD如图3(f)所示，量子效率为71.3%@400 nm，蓝绿光波段带宽为1.5 GHz[33]。现今蓝绿光通信系统的光源普遍采用GaN激光器，其速率已增加到9 Gbps[34-35]，鉴于Si探测器的高稳定、低成本、高成熟度等优势，而且探测器的带宽已实现～GHz量级，因此，现今研制的蓝绿光通信系统信号接收端普遍采用Si探测器以满足通信链路速率的要求。

表1 不同的研究机构在高速Si探测器的最新成果对比

CMOS工艺	器件结构	有源区	量子效率/%	响应速率	研究机构
0.35 μm	n-well/p-sub	100×100 μm^2	～41.3%@450 nm	～10MHz@680 nm	美国纽约特洛伊理工学院[36]
0.18 μm	P^+/n-well APD	20×20 μm^2	～33.6%@405 nm	＞10MHz@520 nm	马来西亚技术大学[37]
0.18 μm	n^+/p-well APD	50×50 μm^2	～71.3%@400 nm	1.5GHz@405 nm	日本金泽大学[33]
0.13 μm	P^+/n-well/p-sub APD	270×270 μm^2	＞27.56%@540 nm		新墨西哥大学[38]
0.13 μm	P^+/n-well APD	5×5 μm^2	～7.3%@850 nm	12GHz@850 nm	延世大学[39]
40 nm	p^+/n-well/p-sub Avalanche-double photodiode	30×30 μm^2	～28.6%@520 nm	1.4GHz@520 nm	维也纳工业大学[31]
45 nm	Double p-well/deep p-well APD	20×20 μm^2	～5.8%@850 nm	8.4GHz@850 nm	江南大学2020[40]
2 μm	Lateral p-i-n	2300 μm^2	77.1%@850 nm	14.1GHz@850 nm	北京工业大学[32]

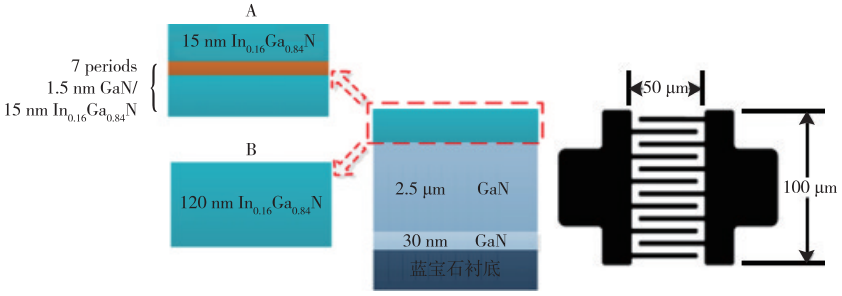
2.3 基于组分调节的GaN系材料光电探测器

GaN系材料一般是指氮化镓(GaN)以及其多元化合物(如AlGaN，InGaN和InPGaN)材料。相较于第一代(Si，Ge)与第二代半导体(GaAs，InP)，GaN基材料具有大禁带宽度、直接带隙、强极化效应、大的电子饱和迁移速度等特点，在电力、电子、微波射频和光电领域有广泛应用前景。其中，AlGaN随着Al分量调节带隙宽度(3.42～6.02 eV)，具有高击穿电场与高电子迁移率，常用于功率半导体领域。$In_xGa_{1-x}N$材料通过调节In分量，从而调节带隙宽度(0.7～3.4 eV)，可将吸收峰从紫外扩展到近红外多波段，材料具有高的击穿电场和热导率。因此，$In_xGa_{1-x}N$材料探测器在蓝绿光通信领域具有巨大潜力[41]。

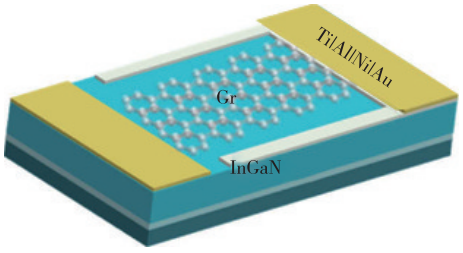
江浩课题组利用低压MOCVD技术在蓝宝石衬底上生长InGaN材料，利用电子束蒸发沉积叉指型铱(Ir)薄膜，并结合退火氧化形成透明氧化铱(IrO_2)叉指肖特基电极，以此材料制备出的InGaN-MSM探测器结构如图4(a)所示。利用光电导效应实现光增益，器件响应度达到1.9 A/W@420 nm，器件暗电流为7.0×10^{-11} A@－5 V。为降低暗电流，在InGaN外延层中周期性加入GaN层，所研制的芯片暗电流降低了两个数量级，却牺牲了光响应(0.085 A/W@420 nm)[42]。Nanda等在AlN衬底上外延制备的n-InGaN/AlN/n-Si异质结构光电探测器，器件峰值光响应在580 nm处为9.64 A/W，器件在蓝绿光波段光响应在6～9 A/W之间，器件光响应时间和恢复时间为19.9 μs和21.4 μs[43]。为实现

InGaN 器件与硅基电路的单片集成，李国强等在 Si 衬底制备的 InGaN-MSM 蓝光探测器，响应度为 0.49 A/W@425 nm，瞬态响应上升下降时间分别为 1.25 ms/1.74 ms@−3 V[44]。

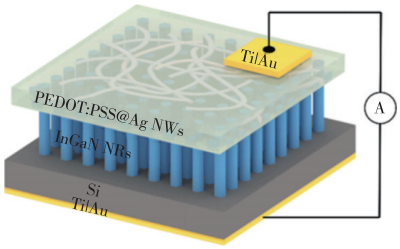
经研究发现，InGaN-MSM 探测器同样面临低响应速度的问题（毫秒量级），而且入射面的金属电极会减少有效通过面积，降低器件响应度，在 InGaN 中引入透明电极以提高器件响应度和速度是解决该问题的方法之一。因此，李国强团队利用透明电极制备 T-Gr/InGaN 异质结光电二极管如图 4（b）所示，器件响应度达到 1.3A/W@40nm，上升时间/下降时间为 60 μs/20 μs[45]。该团队还将 Ti_3C_2TX 悬浮液旋涂沉积到 InGaN 表面上，获得 Ti_3C_2TX/InGaN 微型 PD。由于二维导电材料 Ti_3C_2TX 作为过渡金属碳化物或碳氮化物，具有与石墨烯类似的二维结构，单片尺寸大，具有广泛可调的功函数，与各种半导体材料形成高势垒的肖特基接触，可增强光生载流子的传输。因此，基于该材料的探测器件光响应度达 6 A/W@470 nm，脉冲响应上升/下降时间降低至 7.1 μs /183.2 μs，响应带宽为 49.296 kHz[46]。利用纳米结构和聚合物材料亦可以降低暗电流，提高速率。该团队利用 InGaN 纳米棒与有机导电聚合物聚 3,4-乙烯二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐（PEDOT:PSS）结合形成异质结如图 4（c）所示，利用 Ag 纳米线产生表面等离子效应，提高光吸收效率，所制备器件在 −1 V 和 420 nm 光照射下响应度为 2.9 A/W、瞬态响应上升/下降时间为 439 μs /725 μs[47]。



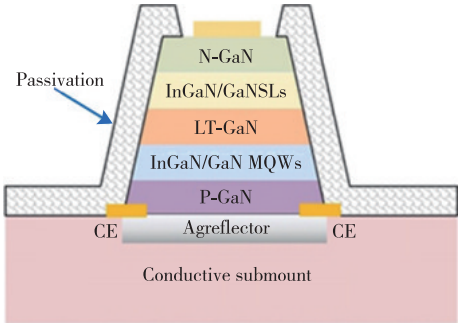
（a）具有叉指电极 GaN/InGaN-MSM 探测器结构 A 和简单 InGaN-MSM 探测器结构 B[42]



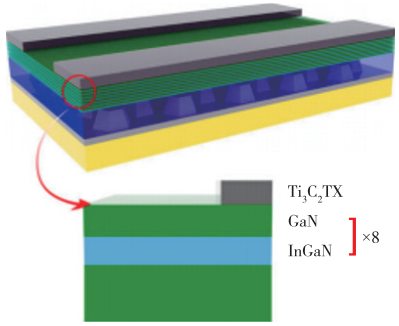
（b）Gr/InGaN 异质结光电二极管结构图[45]



（c）InGaNNR/PEDOT:PSS@AgNW 探测器结构[47]



（d）InGaN/GaN MQW---InGaN/GaN 超量子阱（SLs）探测器结构[48]



（e）基于 MXene-InGaN/GaNMQW-MXene 结构探测器的示意图[49]

图 4　基于组分调节的 GaN 系材料光电探测器

为进一步提高响应速率，池南等设计了 InGaN/GaN 超晶格（SLs）结构器件，如图 4（d）所示，在制备过程中从顶部 N-GaN 层开始颠倒生长 InGaN/GaN SLs 层、低温 GaN 层（LT-GaN）和 InGaN/GaN 量子阱层（MQW）并在底部导电基板上方加入 Ag 反射层提高光吸收效率，器件光敏面 1 mm^2，超晶格周期 32，获得最大数据传输速率 8.8 Gb/s、响应度大于 100 mA/W@405 nm。此外，基于超晶格结构，

该课题组还设计了具有50 μm×50 μm小光敏面的4×4阵列探测器，获得15.26 Gb/s的并行数据传输速率[48]。江吴等在蓝宝石衬底上将二维Ti_3C_2TX材料和量子阱结构相结合制备的Ti_3C_2TX-InGaN/GaN MQW-Ti_3C_2TX结构探测器，与传统的Cr/Au-InGaN-GaN-Cr/Au MSM光电探测器相比，Ti_3C_2TX-GaN范德华结界面具有化学无序性和低缺陷密度，器件的暗电流降低了三个数量级（10^{-7} A@−2 V），器件响应度达64.6 A/W@405 nm[49]。

表2整理了近几十年国内外在GaN系材料光电探测器的研究成果，通过设计多种结构和工艺提高材料质量和器件性能。最高响应度为Aiello等制备的InGaN/GaN纳米线盘状阵列（disk-in-nanowire array）光电导探测器～100A/W@500 nm[50]，GaN基器件光响应速度已经达到微秒量级，但是器件响应峰值大多处于紫蓝光波段。虽然，InGaN可以通过In组分调节带隙（0.7～3.4 eV），但是实现绿光波段（500～580 nm）峰值光响应需要In组分大于25%，而高In含量易引发相分离和晶格失配，从而加剧俄歇复合，降低探测器的量子效率。而且InGaN材料在生长过程中容易形成缺陷，材料敏感，缺乏长期稳定性和可靠性。InGaN和所用衬底之间的大晶格失配，也导致高缺陷密度、低载流子迁移率和相对低的载流子寿命，限制了InGaN-PDs的性能。目前，针对晶格适配和材料生长缺陷问题进行了许多研究，如在硅衬底上生长AlN或AlGaN缓冲层，降低位错密度（位错密度可降至6×10^8 cm^{-2}），抑制裂纹[51]；利用周期性交替生长InGaN与GaN层超晶格结构，填充原生V形缺陷（V-pits），降低表面粗糙度，提升材料质量[52]；采用新型衬底材料或复合材料如SiC衬底，解决晶格适配问题；还有探索通过热壁外延技术、分子数外延结合低温缓冲层等技术来实现高质量InGaN层生长。总而言之，制备高晶格匹配、低缺陷、高稳定的InGaN材料仍然是GaN系蓝绿光光电探测器研究的重点和难点。

表2 基于组分调节的GaN系材料光电探测器研究进展

器件结构	响应度	响应速率特性（带宽/瞬态响应上升/下降时间）	研究机构
GaN/InGaN(周期性)-MSM	0.085 A/W@420 nm		中山大学[42]
InGaN-MSM	1.9 A/W@420 nm		
n-InGaN/AlN/n-Si	9.64 A/W@580 nm	19.9/21.4 μs	印度科学研究所材料研究中心[43]
InGaN-MSM	0.49 A/W@425 nm	1.25/1.74 ms@−3 V	华南理工大学[44-46,53]
Gr/InGaN异质结	1.39 A/W@430 nm	60/200 μs	
Ti_3C_2TX/InGaN	6 A/W@470 nm	7.1/183.2 μs	
InN/InGaN NRA	9.27 A/W@400 nm ＞4 A/W@450 nm	18.2/24.7 μs	
InGaN/GaN MQW—SLs	＞0.1 A/W@405 nm	2.3 GHz/15.26 Gbps	复旦大学[48]
2D Ti_3C_2TX InGaN/GaN MQW	64.6 A/W@405 nm		电子科技大学[49]
InGaN/GaN disk-in-nanowire array	～1450 A/W@360 nm ～100 A/W@500 nm		密立根大学[50]
InGaN/GaN MQW	0.11 A/W@405 nm	0.3 GHz/7.4 Gbps	阿卜杜拉国王科技大学[54]

3 总结

深海通信是海洋经济和海洋勘探开发的保障，在海洋工程中扮演重要的角色。该技术要求通信带宽大、抗干扰性强，实现实时信息传输，以及无污染特性有利于对海洋生态环境的保护。研究适合水下环境的通信技术已成为当前科学领域的一个重要课题。蓝绿光波段是水下传输的低损耗（约为0.4 dB/m）窗口，水下通信的蓝绿光探测器根据吸收材料和器件结构分为三大类。第一类为基于能带调控技术的低维材料器件，该器件具有超高光响应度（约为10^6 A/W）的优势，但是材料质量限制了器件光响应速率（约为10^{-2} s），尚无法在通信领域中应用。第二类为基于低成本高成熟度的Si器件，探测器的量子效率大于80%@500 nm，可采用成熟的CMOS工艺制备，器件蓝绿光波段测得的最高带宽为1.5 GHz，但受到器件结构和材料性能限制，超高带宽（大于15 GHz）很难实现。第三类是组分调节的GaN系材料探测器，GaN系材料具有低载流子复合速率和高电子迁移率的优点，研制的器件最高可以实现15.26 Gbps的数据传输速率，但是解决与衬底的晶格失配问题以及生长高质量富In材料是GaN

系材料蓝绿光探测器研究的重点。随着水下无线光通信日益增大的应用需求，蓝绿光探测器在吸收系数、光响应速率、灵敏度、暗电流和噪声等方面的要求会越来越高，因此，高速、高灵敏、高稳定、高集成度的仍是蓝绿光通信探测研究的重点。

参考文献：

[1] Schirripa Spagnolo G, Cozzella L, Leccese F. Underwater optical wireless communications: overview [J]. Sensors, 2020, 20(8): 2261.

[2] 王林宁，刘鹏展，胡芳仁，等. 面向6G网络的水下光通信系统[J]. 移动通信，2022，46(6)：45-51.
Wang Linning, Liu Pengzhan, Hu Fangren, et al. Underwater optical wireless communication system for 6G networks [J]. Mobile Communications, 2022, 46(6): 45-51.

[3] Zeng Z. A survey of underwater wireless optical communication [D]. University of British Columbia, 2015.

[4] Fujita S. Wide-bandgap semiconductor materials: for their full bloom[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(3): 030101.

[5] 余金中. 半导体光子学[M]. 北京：科学出版社，2015.

[6] Sai N, Shao Z, Wu M, et al. Flexible Te nanorod array/thin Si mixed-dimensional heterojunction photodetectors with 99% light absorptance for long-distance, multi-environment adaptive underwater wireless optical communication [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 519: 165255.

[7] Wang F, Wang Z, Yin L, et al. 2D library beyond graphene and transition metal dichalcogenides: a focus on photodetection [J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(16): 6296-6341.

[8] Nur R, Tsuchiya T, Toprasertpong K, et al. High responsivity in MoS_2 phototransistors based on charge trapping HfO_2 dielectrics [J]. Communications Materials, 2020, 1: 103.

[9] Deng W, Chen Y, You C, et al. High detectivity from a lateral graphene - MoS_2 Schottky photodetector grown by chemical vapor deposition[J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(9): 1800069.

[10] Zhang Z, Ji P, Li S, et al. High-performance broadband flexible photodetector based on $Gd_3Fe_5O_{12}$-assisted double van der Waals heterojunctions [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2023, 9: 84.

[11] Ning Y, Zhang Z, Teng F, et al. Novel transparent and self-powered UV photodetector based on crossed ZnO nanofiber array homojunction[J]. Small, 2018, 14(13): 1703754.

[12] Zhang Y, Xu W, Xu X, et al. Self-powered dual-color UV - green photodetectors based on SnO_2 millimeter wire and microwires/$CsPbBr_3$ particle heterojunctions[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2019, 10(4): 836-841.

[13] Liu J, Liu F, Liu H, et al. Mixed-dimensional CsPbBr 3@ZnO heterostructures for high-performance p-n diodes and photodetectors[J]. Nano Today, 2021, 36: 101055.

[14] Chen H, Lin Z, Qiu H, et al. High-responsivity natural-electrolyte undersea photoelectrochemical photodetector with self-powered Cu@GaN nanowires network [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(29): 2302872.

[15] Luo L B, Zheng K, Ge C W, et al. Surface plasmon-enhanced nano-photodetector for green light detection [J]. Plasmonics, 2016, 11(2): 619-625.

[16] Gao L, Chen C, Zeng K, et al. Broadband, sensitive and spectrally distinctive SnS_2 nanosheet/PbS colloidal quantum dot hybrid photodetector[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(7): e16126.

[17] Tian W, Liu D, Cao F, et al. Hybrid nanostructures for photodetectors[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(4): 1600468.

[18] Gao Y, Cansizoglu H, Polat K G, et al. Photon-trapping microstructures enable high-speed high-efficiency silicon photodiodes[J]. Nature Photonics, 2017, 11(5): 301-308.

[19] Rowan O. Photodetectors: Devices and Applications [M]. Larsen and Keller Education, 2017.

[20] Unsuree N, Selvi H, Crabb M G, et al. Visible and infrared photocurrent enhancement in a graphene-silicon Schottky photodetector through surface-states and electric field engineering[J]. 2D Materials, 2019, 6(4): 041004.

[21] An Y, Behnam A, Pop E, et al. Metal-semiconductor-metal photodetectors based on graphene/*p*-type silicon Schottky junctions [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102 (1): 013110.

[22] Riazimehr S, Kataria S, Gonzalez-Medina J M, et al. High responsivity and quantum efficiency of graphene/silicon photodiodes achieved by interdigitating Schottky and gated regions[J]. ACS Photonics, 2019, 6(1): 107-115.

[23] Selvi H, Unsuree N, Whittaker E, et al. Towards substrate engineering of graphene - silicon Schottky diode photodetectors [J]. Nanoscale, 2018, 10(7): 3399-3409.

[24] Ji P, Yang S, Wang Y, et al. High-performance photodetector based on an interface engineering-assisted graphene/silicon Schottky junction [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2022, 8: 9.

[25] Wang Y, Yang S, Lambada D R, et al. A graphene-silicon Schottky photodetector with graphene oxide interlayer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112232.

[26] Huang Z, Mao Y, Lin G, et al. Low dark current broadband 360-1650 nm ITO/Ag/n-Si Schottky photodetectors [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5827.

[27] Xu H, Ren A, Wu J, et al. Recent advances in 2D MXenes for photodetection[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(24): 2000907.

[28] Xie H, Peng Y, Li J, et al. Lateral separate absorption multibuffer multiplication avalanche photodiode based on SOI film [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(7): 3003-3006.

[29] Xie H, Liu G, Cai X, et al. Impact of circular layout on

characteristics in LSAMBM APD based on SOI film [J]. Silicon, 2022, 14(7): 3395-3401.

[30] Alirezaei I S, Andre N, Flandre D. Enhanced ultraviolet avalanche photodiode with 640-nm-thin silicon body based on SOI technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(11): 4641-4644.

[31] Atef M, Polzer A, Zimmermann H. Avalanche double photodiode in 40-nm standard CMOS technology [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(3): 350-356.

[32] Qin S, Li C, Li B, et al. All-Si large-area photodetectors with bandwidth of more than 10 GHz[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(12): 5187-5190.

[33] Iiyama K, Maruyama T, Gyobu R, et al. High speed and high responsivity avalanche photodiode fabricated by standard CMOS process in blue wavelength region [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2018, E101. C(7): 574-580.

[34] Zafar F, Bakaul M, Parthiban R. Laser-diode-based visible light communication: toward gigabit class communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 144-151.

[35] Chen C W, Wang W C, Wu J T, et al. Visible light communications for the implementation of Internet-of-things [J]. Optical Engineering, 2016, 55(6): 060501.

[36] Fahs B, Chowdhury A J, Zhang Y, et al. Design and modeling of blue-enhanced and bandwidth-extended PN photodiode in standard CMOS technology [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(7): 2859-2866.

[37] Mohammed Napiah Z A F, Hishiki T, Iiyama K. Wavelength dependence of silicon avalanche photodiode fabricated by CMOS process [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 92: 193-197.

[38] Hossain M M, Ray S, Cheong J S, et al. Low-noise speed-optimized large area CMOS avalanche photodetector for visible light communication [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(11): 2315-2324.

[39] Lee M J, Choi W Y. Performance optimization and improvement of silicon avalanche photodetectors in standard CMOS technology [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(2): 3801013.

[40] Zhi W, Quan Q, Yu P, et al. A 45 nm CMOS avalanche photodiode with 8.4-GHz bandwidth [J]. Micromachines, 2020, 11(1): 65.

[41] Ho K T, Chen R, Liu G, et al. 3.2 gigabit-per-second visible light communication link with InGaN/GaN MQW micro-photodetector [J]. Optics Express, 2018, 26 (3): 3037-3045.

[42] Wang H, Zhang X, Wang H, et al. $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ visible-light metal-semiconductor-metal photodetector with GaN interlayers deposited by pulsed NH_3 [J]. Journal of Crystal Growth, 2018, 489: 31-35.

[43] Chowdhury A M, Chandan G, Pant R, et al. Self-powered, broad band, and ultrafast InGaN-based photodetector [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(10): 10418-10425.

[44] Chai J, Kong D, Chen S, et al. High responsivity and high speed InGaN-based blue-light photodetectors on Si substrates [J]. RSC Advances, 2021, 11(40): 25079-25083.

[45] Chai J, Chen L, Cao B, et al. High-speed graphene/InGaN heterojunction photodetectors for potential application in visible light communication [J]. Optics Express, 2022, 30 (3): 3903-3912.

[46] Kong D, Lin T, Chai J, et al. A self-powered MXene/InGaN van der Waals heterojunction mini-photodetector for visible light communication [J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(14): 142104.

[47] Chen L, Xie S, Lan J, et al. High-speed and high-responsivity blue light photodetector with an InGaN NR/PEDOT: PSS heterojunction decorated with Ag NWs [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(22): 29477-29487.

[48] Xu Z, Luo Z, Lin X, et al. 15.26Gb/s Si-substrate GaN high-speed visible light photodetector with super-lattice structure[J]. Optics Express, 2023, 31(20): 33064-33076.

[49] Luo L, Huang Y, Cheng K, et al. MXene-GaN van der Waals metal-semiconductor junctions for high performance multiple quantum well photodetectors [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 177.

[50] Aiello A, Hoque A K M H, Baten M Z, et al. High-gain silicon-based InGaN/GaN dot-in-nanowire array photodetector[J]. ACS Photonics, 2019, 6(5): 1289-1294.

[51] Ko T S, Lin D Y, Lin C F, et al. High-temperature carrier density and mobility enhancements in AlGaN/GaN HEMT using AlN spacer layer[J]. Journal of Crystal Growth, 2017, 464: 175-179.

[52] Zhang S, Li M C, Feng Z H, et al. High electron mobility and low sheet resistance in lattice-matched AlInN/AlN/GaN/AlN/GaN double-channel heterostructure [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(21): 212101.

[53] Chai J, Liu Q, Chen L, et al. Axial InN/InGaN nanorod array heterojunction photodetector with ultrafast speed [J]. Advanced Electronic Materials, 2023, 9(3): 2201193.

[54] Alkhazragi O, Kang C H, Kong M, et al. 7.4-gbit/s visible-light communication utilizing wavelength-selective semipolar micro-photodetector [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(13): 767-770.

作者简介：

李亚明(1985—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向：微波光子学与微波射频技术；

李　冲(1987—)，女，副教授，博士生导师，主要研究方向：半导体光电子芯片，包括硅基高速探测器、III－V族成像阵列芯片、VCSEL芯片等。