

文章编号: 1001-3806(2022)05-0601-09

单光子探测器的研究进展

程碑彤¹, 代千¹, 谢修敏¹, 徐强¹, 张杉¹, 宋海智^{1,2*}

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 电子科技大学 基础与前沿研究院, 成都 610054)

摘要: 单光子探测器能够探测极微弱光信号, 具有较高的灵敏度, 在民用和国防领域都有广泛的应用。近年来, 随着科学技术的飞速发展, 在传统光电探测器件不断优化和改进的同时, 其它新型光电探测器件也得到了极大发展且取得了重要技术成果。为深入了解单光子探测器的技术发展现状和趋势, 总结了目前具有代表性的单光子探测器在研究现状、技术难点和最新技术突破等方面的关键信息, 分析了光电倍增管和雪崩光电二极管等传统单光子探测器的优势与不足以及之后的技术发展方向, 同时还介绍了超导纳米线单光子探测器和基于新型 2 维材料的雪崩光电二极管等几类具有良好光电性能和巨大发展潜力的新型单光子探测器, 并对其发展前景进行了展望。

关键词: 探测器; 单光子; 光电倍增管; 雪崩光电二极管; 超导; 2 维材料

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.05.004

Research progress of single-photon detectors

CHENG Beitong¹, DAI Qian¹, XIE Xiumin¹, XU Qiang¹, ZHANG Shan¹, SONG Haizhi^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Single-photon detector can detect very weak light with high sensitivity, which has been widely used in the field of civil and national defense. With the development of technology, in addition to the optimization and improvement of traditional photodetectors, other new photodetectors have also been greatly developed and important technical achievements have been made. In order to deeply understand the development status and trend of single-photon detectors, the key information in research status, technical difficulties, and latest technological breakthroughs of representative single-photon detectors were summarized. The advantages and disadvantages of traditional single-photon detectors such as photomultiplier tube and avalanche photodiode were analyzed as well as the future technical development direction. At the same time, the superconducting nanowire single-photon detectors and avalanche photodiode based on new 2-D materials with good photoperformance and great development potential were introduced. And the future direction was prospected.

Key words: detectors; single-photon; photomultiplier tube; avalanche photodiode; superconducting; 2-D materials

引 言

单光子探测技术是支撑前沿科技发展的重要推动技术之一, 在物理化学、生物环境、国防军事等领域都有重要应用, 特别是与激光、量子信息、生物荧光、非线性光学等技术结合形成多种交叉技术, 在量子通信、资源普查、空间探测、远距雷达等方面都有日益增长的广

泛需求。

单光子探测器 (single-photon detector, SPD) 是单光子探测技术的核心器件, 是检测极微弱单光子信号的一类器件统称, 属于超低噪声器件, 凭借其超高的灵敏度完成对单个光子的检测和计数, 被广泛用于探测信号强度只有几个单光子能量级的应用中。基本功能是将光信号转换为电信号, 主要分为外光电效应器件和内光电效应器件, 后者又主要包括光导型器件和光伏型器件等, 其技术发展的趋势是进一步实现高光子探测效率、低暗计数率、低时间抖动、高计数率等技术指标要求。随着新型光电材料与器件技术发展, 新体制、新材料、新结构单光子探测器不断涌现, 单光子探测器得到了研究人员广泛而持续的关注, 是推动技术和应用快速发展的重要原因^[1-2]。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB0504602); 四川省重点研发资助项目 (2020YFG0466)

作者简介: 程碑彤 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体光电材料与器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hzsong1296@163.com

收稿日期: 2021-09-06; 收到修改稿日期: 2021-09-22

1 单光子探测器概述

由于光具有粒子性,它是由大量的光子组合在一起形成的,而单个光子的能量极低,因此,必须采用具有单光子探测能力的光检测器件来实现对极微弱光的探测。单光子探测器因其具有对极微弱光的探测能力而应用广泛,种类也较多。按光谱响应范围可分为紫外(100nm~400nm)、可见(400nm~700nm)、短波红外(1 μ m~2 μ m)、中长波红外(3 μ m~25 μ m)等。按器件工作原理可分为:(1)光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)。包括打拿极 PMT、微通道板(microchannel plate, MCP) PMT 等;(2)雪崩光电二极管(avalanche photodiode, APD)。包括硅盖革雪崩光电二极管(Si Geiger mode avalanche photodiode, Si Gm-APD)、铟镓砷盖革雪崩光电二极管(InGaAs Gm-APD)、硅固态倍增管(Si photomultiplier, SiPM)等;(3)超导器件。包括超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)、超导临界温度跃迁单光子探测器(transition edge sensor, TES)等;(4)量子器件。包括量子阱(quantum well, QW)单光子探测器、量子点(quantum dot, QD)单光子探测器;(5)非线性器件。包括自发参量下转换(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)单光子探测器、频率上转换单光子探测器等。

光电倍增管是历史最悠久、技术最成熟的单光子检测器件,而雪崩光电二极管凭借其雪崩倍增效应目前仍在微弱光探测领域发挥着巨大作用,但两者都属于传统的单光子检测器件,已经无法完全满足量子信息等先进技术的应用需求,因此,必须对传统的单光子探测器作出改进和指出未来技术发展趋势。与此同时,探索新兴的超导单光子器件以及基于2维材料的光电探测器件显得尤为迫切,它们相对于传统的单光子探测器件,实现了在某些性能上的本质提升,是未来单光子探测技术取得突破性进展的关键。

2 光电倍增管

光电倍增管(PMT)是基于外光电效应和二次电子发射理论的真空器件,广泛应用于微弱光子探测。PMT按照阴极光探测直径的不同可以分为小面积型PMT(探测面直径小于20.32cm)和大面积型PMT(探测面直径为20.32cm~50.8cm)。不同类型的PMT针对不同的应用场景需求,比如小面积型PMT主要用于激光雷达、光子计数、正电子发射扫描仪等,而大面积

型PMT主要用于大型中微子探测、伽马射线探测、望远镜观测等高能物理实验研究领域。目前应用最广的是打拿极PMT和微通道板(MCP)PMT,其中MCP-PMT在打拿极PMT的基础之上进行了器件结构优化。

2.1 打拿极PMT

打拿极PMT的基本结构由光电阴极、光电倍增极(打拿极)和阳极(收集极)组成,如图1所示。其基本原理是光电阴极吸收入射光产生光电子,通过打拿极实现电子倍增,在达到一定数量级后就能转换成电压或者电流信号输出,而输出信号的幅值就反映了入射光信号的强弱。对于打拿极PMT来说,器件基本结构已经固定,目前的关键技术突破方向主要集中在制备新型光电阴极材料和优化打拿极结构等方面。

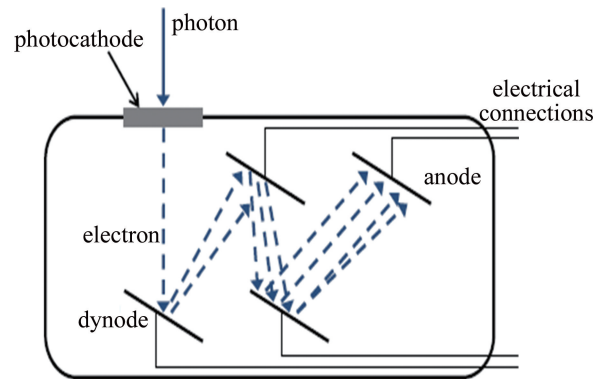


图1 打拿极PMT基本结构图^[2]

2014年,日本滨松(Hamamatsu)公司设计的改进型ultra bialkali(UBA)和super bialkali(SBA)双碱阴极PMT与普通的打拿极PMT相比,光谱响应度明显提升1倍^[3],UBA,SBA以及标准双碱的光谱响应对比图如图2所示。2020年,Hamamatsu公司进行了PMT的全面大改造,首先是采用先进的光电阴极技术将量子效率提高到了30%,同时还将打拿极结构由百叶窗型优化改进为直线聚焦型,并且在减少打拿极数量(11个变为10个)的基础上又将光收集效率提高到90%以上^[4],如图3所示。

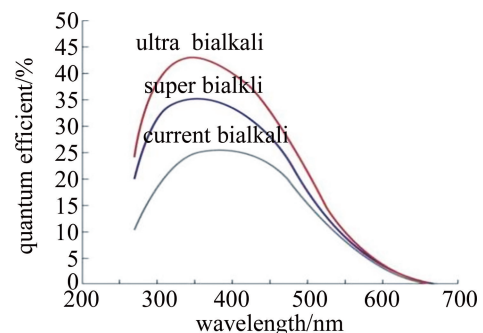


图2 光谱响应图^[3]

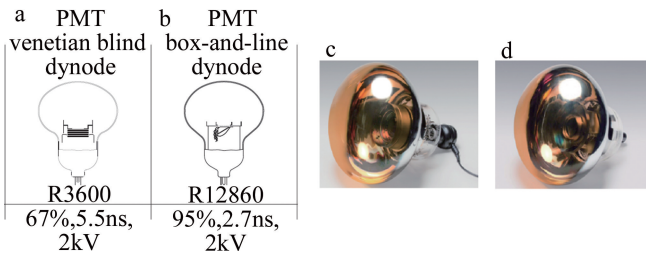


图 3 日本 Hamamatsu 公司生产的大面积打拿极 PMT 结构图与样图^[4]
 a—R3600 型 PMT 内部结构图 b—R12860 型 PMT 内部结构图 c—R3600 型 PMT 样管 d—R12860 型 PMT 样管

2.2 MCP-PMT

MCP-PMT 与打拿极 PMT 的不同之处在于其采用微通道板 (MCP) 代替传统的分离式多级倍增极。MCP 内包含成百上万个微通道 (直径一般为 $6\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$), 每个微通道里都涂有二次电子发射材料, 可视为一个单独的二次电子倍增器。目前技术比较成熟的 MCP-PMT 为近贴聚焦型, 相对打拿极 PMT 来说具有增益高、抗磁能力强等突出特点。但是商用 MCP-PMT 中通常采用氢还原铅硅酸盐玻璃制备技术, 导致 MCP-PMT 的寿命极短、探测效率也极低。因此, 延长 MCP-PMT 寿命并降低成本是微通道板技术提升的关键。

针对上述问题, 研究人员提出了采用硼硅酸盐作衬底, 利用原子层沉积技术 (atomic layer deposition, ALD) 在硼硅酸盐表面蒸镀 MgO 或者 Al_2O_3 等作为二次电子发射材料制备 MCP-PMT^[5]。如美国 Argonne 国家实验室和 Income Inc. 基于该技术已成功制备出 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的 MCP-PMT, 样图如图 4 所示。量子效率在 365nm 处约为 25%, 增益达到 10^7 , 单光子时间分辨率约为 50ps ^[6]。而德国 Nuremberg-Erlangend 大学的 LEHMANN 长期从事检测各种类型 MCP-PMT 的寿命的实验工作, 实验结果证明, 基于 ALD 技术制备的 MCP-PMT 寿命相比传统 MCP-PMT 增加了约 100 倍且增益特性也明显改善^[7], 寿命检测结果如图 5 所示。

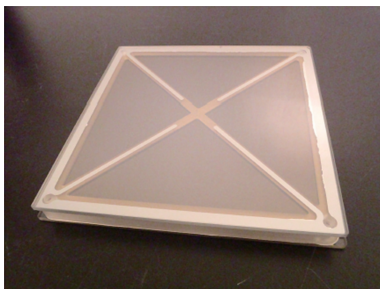


图 4 ALD-MCP 样品图^[6]

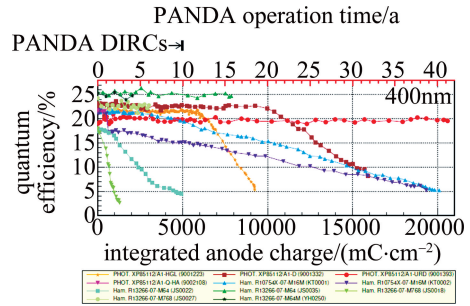


图 5 不同类型 ALD-MCP-PMT 的寿命检测结果对比^[7]

3 雪崩光电二极管

雪崩光电二极管 (APD) 是基于雪崩碰撞电离放大机制的光电探测器件, 由于其具有低功耗、小型化、高速、高可靠等技术特点, 在微弱光及单光子探测领域占有重要地位, 在量子通信、激光雷达以及激光 3 维成像等热点领域都有广泛应用。能够实现单光子探测的 APD 是周期性工作, 在高于 APD 击穿电压的盖革雪崩光电二极管 (Gm-APD) 也称为单光子雪崩二极管 (single-photon avalanche diode, SPAD), 通过配套淬灭和读出电路对雪崩倍增过程进行淬灭和恢复控制从而实现单光子探测。图 6 是 SPAD 的基本结构和原理示意图^[8]。目前 SPAD 中最常使用的半导体材料是 Si 材料和 InGaAs 等 III-V 族化合物材料^[9-10]。

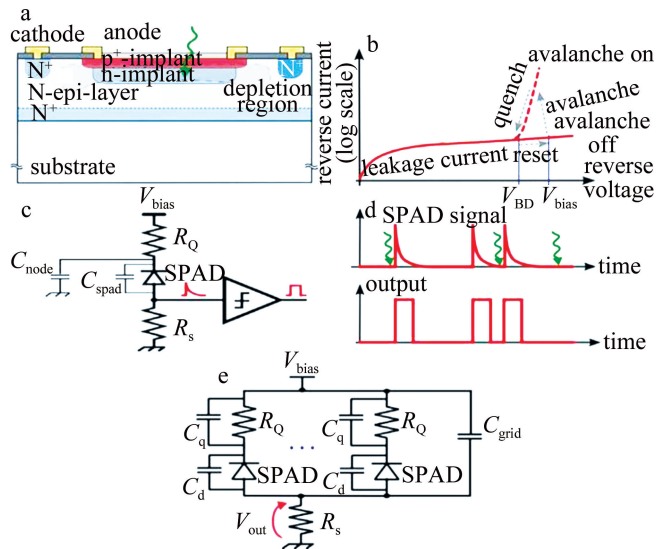


图 6 SPAD 的基本结构和原理示意图^[8]

a—SPAD 结构图 (以 Si 为例) b—偏置电压与偏置电流曲线图 c—典型的 SPAD 读出电路 d—模拟输出和数字化信号的例子 e—典型 SiPM 等效图 (由许多 SPADs 构成)

3.1 Si SPAD

1963年, HAITZ 等人首次展示了采用厚耗尽层 ($30\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$) 结构的 Si SPAD, 虽然光子探测效率在 400nm 和 600nm 处高于 50% , 但时间抖动较大 (约 400ps)、偏置电压较高 (约 400V)^[1-2,9]。因此, 约在 2008 年后又开始采用薄耗尽层 (约 $1\mu\text{m}$) 结构, 在室温下时间抖动低至 30ps , 但由于吸收效率较低, 探测效率在 800nm 处仅有 15% ^[1,11]。2015 年, 有人提出了一种具有新颖纳米结构的 Si SPAD, 如图 7 所示。其原理类似于光捕获增强机制^[12-13], 其探测效率可与厚耗尽层结构 Si SPAD 相比拟, 但又能保持一个相对较好的时间抖动特性。该器件的 3 维模型图如图 8 所示。

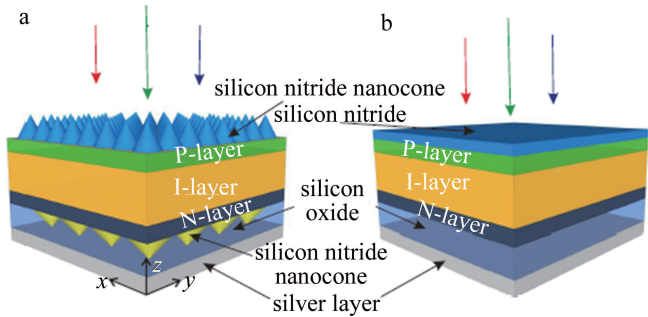


图 7 具有氮化硅纳米堆的 Si SPAD 与传统平面 Si SPAD 的结构对比^[12]

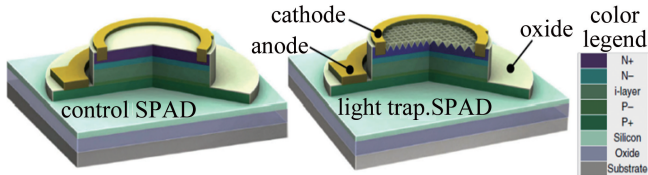


图 8 光捕获结构 Si SPAD^[13]

Si SPAD 具有高探测效率、低暗计数率、低成本等特点, 在量子通信、激光雷达等领域得到广泛应用, 但 Si 材料的带隙较大, 导致 Si SPAD 器件光谱响应波长范围最大值只能达到 $1\mu\text{m}$ 左右, 因此, 拓宽 Si SPAD 的短波红外光谱响应波长范围是目前的技术难点之一。目前, 已经有文献报道用窄带隙的 Ge 材料代替 Si 材料作为 SPAD 器件的吸收层, 制备出 Ge-on-Si SPAD 器件^[14-17], 在 125K 条件下, 实现了 1330nm 处单光子探测效率 (single-photon detection efficiency, SPDE) 达到 38% ^[16], 典型的 Ge-on-Si SPAD 器件结构图如图 9 所示。除此之外, 还提出了基于 Si SPAD 器件的红外上转换单光子探测器 (infrared up-conversion single-photon detector, USPD), 其结构图如图 10 所示。该器件首次实现了在 1550nm 处探测效率约为 45% , 噪声等效功率 (noise equivalent power, NEP) 在 200K 时达到 $1.39 \times 10^{-18} \text{W} \cdot \text{Hz}^{1/2}$, 已经优于 InGaAs SPAD

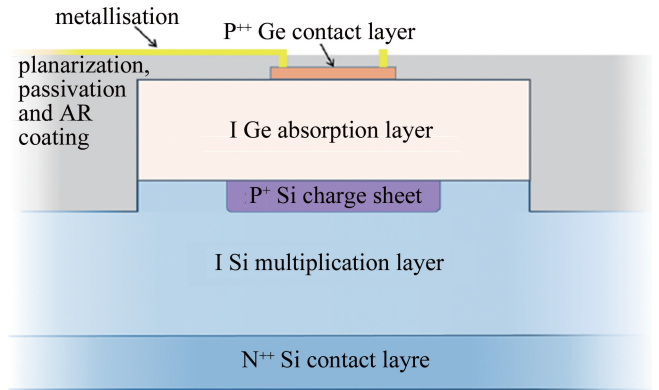


图 9 Ge-on-Si SPAD 器件结构图^[16]

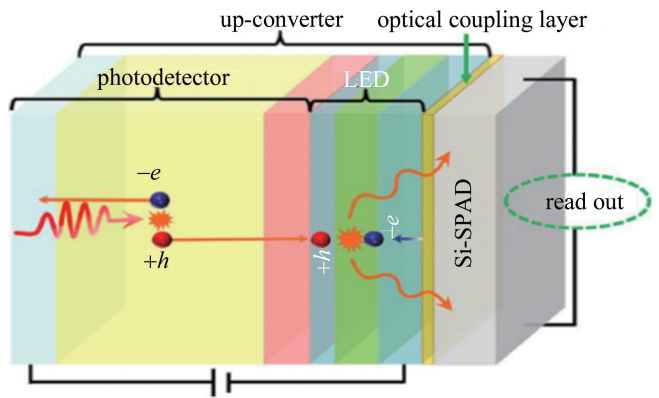


图 10 USPD 器件结构图^[18]

的性能^[18]。除短波红外的成功案例, 2020 年, 报道了基于上转换单光子器件在中红外激光雷达应用中实现高分辨率和高灵敏度的案例^[19]。

3.2 InGaAs/InP SPAD

InGaAs/InP SPAD 主要用于 $0.9\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ 的短波红外单光子探测, 目前基本都采用吸收渐变电荷倍增分离结构 (separated absorption, grading, charge, and multiplication, SAGCM)^[20], 如图 11 所示。但由于目前 InGaAs/InP 材料制备水平相对 Si 材料来说, 材料内部缺陷相对较多, 因此暗计数率 (dark count rate, DCR) 显著高于 Si SPAD 器件, 除此之外, InGaAs/InP SPAD

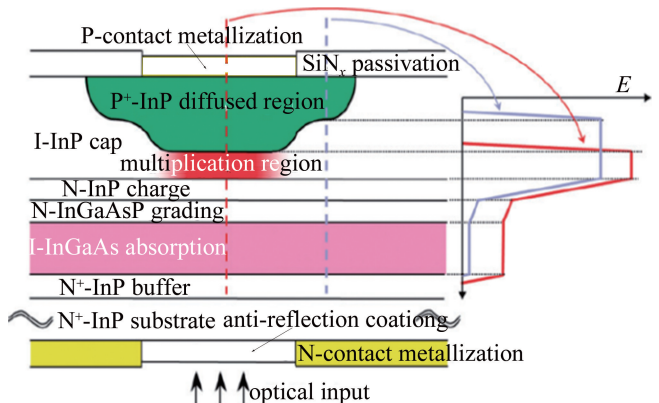


图 11 SAGCM 结构的 InGaAs/InP SPAD^[20]

的光子探测效率 (photon detection e-efficiency, PDE) 是一个非常重要的参数,因此,InGaAs/InP SPAD 目前主要的技术发展方向是通过优化雪崩材料质量和器件结构,实现 PDE 和 DCR 的平衡。

近年针对这一技术难点开展了大量的工作,其中比较具有推进性进展的工作有如下 3 个:(1)2014 年,通过用 InAlAs 材料代替 InP 材料作为雪崩倍增区域材料,其结构图如图 12 所示,单光子探测效率(门控模式下)在 260K 和 290K 温度下为分别为 21% 和 10%,但由于 InAlAs 材料在雪崩区的隧穿电流较大,导致暗计数率仍然很大^[21],但可以通过优化倍增区厚度实现在 90% 的击穿电压下暗计数率小于 50nA^[22]; (2)2017 年,通过在倍增层中引入多个量子阱 (multiple quantum well, MQW) 区域,其结构图如图 13 所示,该结构下的 SPAD 量子效率提高了一个数量级,但由于结构复杂导致材料生长的质量较差,其暗计数率也增加 3 个数量级,因此,该类器件结构作为新颖的研究方向仍需进一步改进和优化^[23]; (3)2020 年,通过增加电介质-金属反射层结构,其结构图如图 14 所示,使入射光子的吸收效率在 1550nm 处相对提高了约 20%,DCR 在 340000/s 时 PDE 达到了 60%,并且在实际应用时,在 DCR 为 3000/s 的参考下,PDE 能够达到 40%,并且后脉冲率低至 5.5%^[24],其性能明显优于目前的商业器件,是目前比较理想的结构优化方案。以上工作虽然在 DCR 和 PDE 参数特性的优化上初见成效,但与此同时带来的工艺、技术以及其它参数上的新

| |
|-------------------------------------|
| P ⁺ :InGaAs contact |
| P ⁺ :InAlAs cladding |
| I:InAlGaAs grading |
| I:InGaAs,600nm |
| I:InAlGaAs grading |
| P ⁺ :InAlAs charge sheet |
| I:InAlAs,200nm |
| N ⁺ :InAlAs cladding |
| N ⁺ :InGaAs contact |
| InP semi-insulating substrate |

图 12 InGaAs/InAlAs SPAD 结构图^[21]

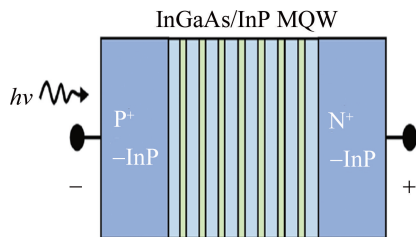


图 13 带 MQW 的倍增区结构图^[23]

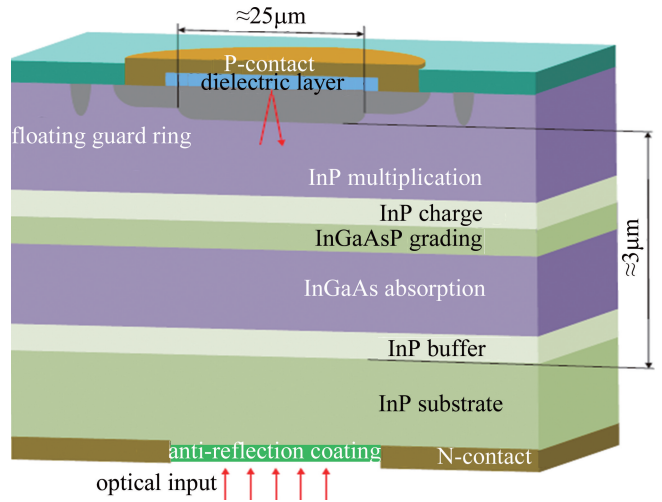


图 14 带有电介质-金属反射层的 InGaAs/InP SPAD 结构图^[24]

问题,仍然有待于解决。

除了以上所述的 Si SPAD 和 InGaAs/InP SPAD 的研究进展,SPAD 近年来在国内也得到了迅速发展,取得了一定成果。比如,西南技术物理研究所等单位相继开展了 Si SPAD 和 InGaAs/InP SPAD 焦平面组件技术研究,研制了 64×64 Si SPAD 和 32×32 InGaAs/InP SPAD^[25],及更大阵列规模的 SPAD 器件,并应用到无人驾驶激光雷达、激光测距、量子通信等领域,表明单光子焦平面组件在先进激光和光电探测中具有十分广阔的应用前景。

3.3 SiPM

硅固态倍增管 (SiPM) 也称为多元光子计数器 (multi-pixel photon counter, MPPC),是一种基于多元微通道技术的硅基固态电子倍增器件,它由成百上千甚至上万个 Gm-APD 并联组成 SiPM 的像素单元,其中每一个像素单元都可作为单独的光子计数器使用。SiPM 的核心是 Gm-APD 器件,其本质是一个 P-N 结,工作于高于击穿电压的盖革模式,光生载流子在外加偏置电压下发生碰撞电离触发雪崩输出光电流。SiPM 像素单元 SPAD 有关的图可参见图 6。

SiPM 具有体积小、成本低、集成度高、抗干扰能力强、探测效率高、工作电压低等特点,已在如正电子发射断层扫描 (positron emission tomography, PET) 技术、高能物理学 (high energy physics, HEP) 实验等不同应用中部分替代了 PMT 或者 MCP-PMT,也在如激光光谱学、量子信息技术、激光雷达技术等单光子或少量光子探测技术中得到应用^[8,26-27]。

SiPM 器件的主要技术难点是同时提高填充系数和探测效率。2013 年,意大利 Fondazione Bruno

Kessler (FBK) 研究中心报道了红绿蓝-高像素密度 (red/green/blue high density, RGB-HD) 器件, 其探测效率的峰值分别在 500nm 附近绿光波段和 400nm 附近近紫外光波段^[28]。2016 年, FBK 研究中心实现了像元直径为 15 μm ~40 μm 等不同规格 SiPM, 同时提出了 SiO₂ 填充沟槽结构实现有效电隔离的 SiPM 技术, 其结构示意图如图 15 所示, 该结构使得探测效率在 420nm 处达到 60%。2018 年~2019 年, FBK 研究中心又在此基础上通过优化沟槽、抗反射涂层、入射窗等结构成功制备出近紫外-高密度-低串扰 (near ultraviolet high density, NUV-HD-low-crosstalk) 型、近紫外-高密度-固态 (NUV-HD-croy) 型和真空-近紫外-高密度 (vacuum near ultraviolet high density, vacuum-NUV-HD) 型 3 种 SiPM 器件^[8, 26-27, 29]。SiPM 在器件结构和工作原理上与 PMT 和 MCP-PMT 有本质的不同, 其性能也存在较大差异, 表 1 中总结了这 3 类单光子探测器在主要性能上的特点^[27]。

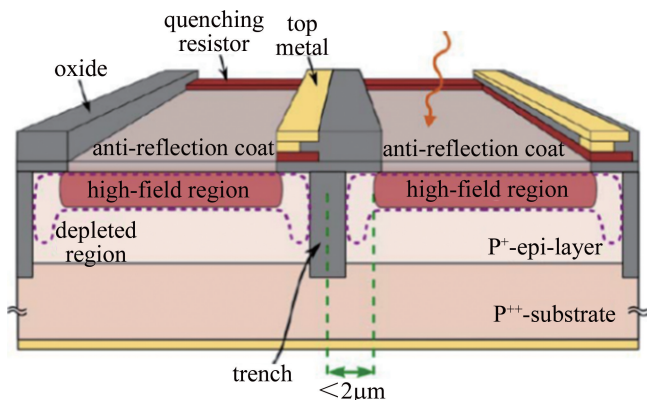


图 15 带有沟槽的 RGB-HD 结构图^[29]

表 1 打拿极 PMT、近贴型 MCP-PMT、SiPM 3 种倍增器件的性能对比^[27]

| 性能 | 打拿极 PMT | SiPM | 近贴型 MCP-PMT |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 工作电压 | >1000V | 30V~80V | >2000V |
| 量子效率 | 20%~25% | 25%~70% | 20%~25% |
| 增益 | $10^5 \sim 10^6$ | $10^5 \sim 10^6$ | $10^5 \sim 10^6$ |
| 上升时间 | 约 1ns | 约 1ns | 200ps~800ps |
| 渡越时间弥散 | <5ns | <300ps | <50ps |
| 温度敏感性 | 低 | 高 | 中 |
| 抗磁场性 | 弱 | 强 | 良好 |
| 探测面积 | 较大 (cm ²) | 较小 (mm ²) | 中等 (mm ²) |
| 结构 | 较大 | 紧凑 | 较紧凑 |
| 单价 | 中等 | 低 | 较高 |

4 新型单光子探测器

随着新光电材料的引入、新器件结构的发展以及半导体光电制造技术的不断提升, 文献相继报道了多

种不同类型的新型单光子探测器, 具有高探测效率、高分辨率、高速响应等特点。其中, 基于 1 维超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 和基于 2 维材料的 APD 单光子探测器的发展较为迅速。

4.1 SNSPD

基于超薄超导材料制备的 SNSPD 的基本原理是超导纳米线吸收光子后会出现有阻的局域非平衡点 “hot-spot”, 从而导致超导纳米线两端产生电压脉冲信号, 通过光电转换实现单光子探测。SNSPD 理论上具有接近 100% 的系统探测效率 (system detection efficiency, SDE), 有望突破传统光电探测器的性能极限, 将大幅提升单光子探测器性能指标, 对量子信息、量子调控和量子通信等技术有重要的支撑作用^[30]。近年来, SNSPD 在器件结构上的优化改进集中在几个方面: (1) 2006 年, 首次将小面积 SNSPD 器件集成到带有背面反射镜的光学腔中, 使得 SDE 分别在 1550nm 和 1064nm 处达到 57% 和 67%^[31], 其结构如图 16 所示; (2) 2017 年, 报道了一种由多晶 NbN 制成的超导纳米线单光子探测器, 采用全反射介质镜面构成分布式布喇格反射镜 (distributed Bragg reflection, DBR) 结构提高纳米线的吸收, 其结构如图 17 所示, 该器件 SDE 在 1550nm 处达到 90.2%, 并随着制冷温度的降低, 在 1.8K 下可达到 92.1%^[32], 该结果将有助于高性能超导单光子探测器件在量子信息领域和其它高端领域中的应用; (3) 2019 年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 YOU 团队采用无损介质镜面加三明治结构制备的 SNSPD 器件, 打破 NbN SNSPD 器件的本征探测响应和光学吸收效率的制衡关系, 实现了两者的同

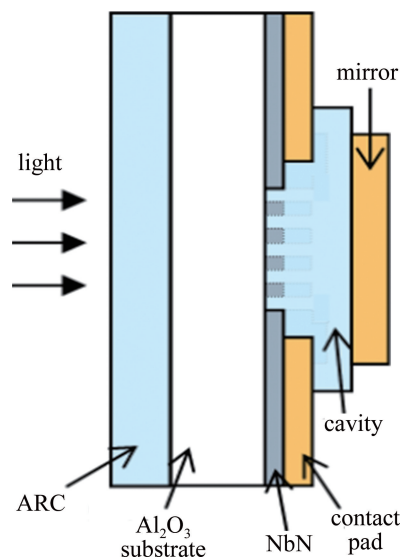


图 16 带有背面反射镜的 SNSPD^[31]

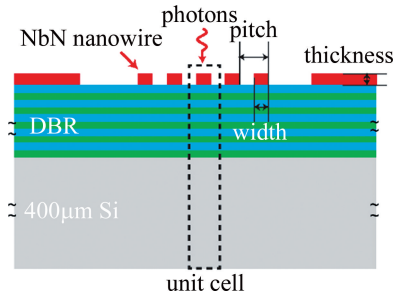


图 17 DBR 结构的 SNSPD^[32]

时提升,其结构示意图如图 18 所示。在 0.8K 工作温度下 SDE 在 1590nm 处达到 98%^[33],且该类型器件显示出了多种参数的鲁棒性,SDE 大于 80%时,产率达到 73%,SDE 大于 90%时,产率达到 36%,对批量生产及商业化应用都有实际意义。

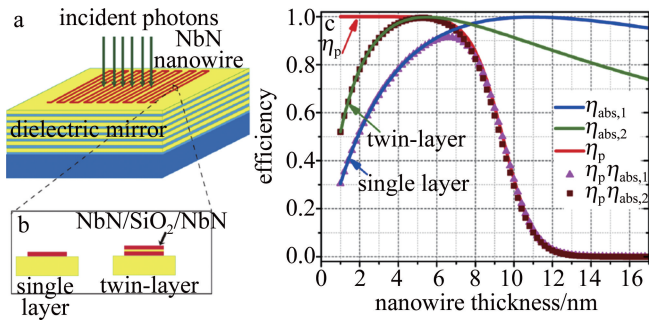


图 18 三明治结构的 SNSPD^[33]

a—器件结构示意图 b—传统单层纳米线与三明治结构纳米线 c—器件光子响应和光学吸收的关系

目前,制约 SNSPD 广泛应用的最大障碍是其需要在极低温条件下工作,需配合大型制冷设备才能实现器件最优性能,因此在一定程度上高度集成低温技术将决定 SNSPD 的未来发展。此外,研发临界转换温度较高的高温超导材料以及 SNSPD 的器件阵列化也是重要发展方向。

4.2 2 维材料 APD (2-D APD)

2 维层状材料与传统的体材料相比,具有自钝化表面、强光物质耦合、可调费米能级和机械灵活性等优良特性,并且材料特性可随着厚度不同而不同^[34-35],近年来得到了研究人员的高度重视和重点研究。其中,2 维层状石墨烯材料是零带隙材料,可以与从紫外光波段到微波波段等电磁波相互作用,使其成为宽光谱范围内各种光检测应用的理想候选材料^[35]。但石墨烯零带隙的性质不利于实现高信噪比的光探测器。相比之下,2 维过渡金属硫化物 (transition metal sulfide, TMD) 如 WSe₂ 和 MoS₂ 是具有一定带隙的材料,能够在可见光到近红外范围内表现出良好的光检测性

能^[36]。除了石墨烯和 TMDs 外,2 维黑磷 (black phosphorous, BP) 的直接带隙从 0.3eV ~ 2.0eV (单层形式),也是一种重要的红外光检测潜在候选材料^[37]。

2 维材料技术的发展也为基于 APD 机制的新型单光子探测器发展提供了新思路,目前正在研究通过碰撞电离产生雪崩效应来实现高检测效率和单光子计数的 2 维材料光电探测器。图 19 ~ 图 21 展示了部分基于 2 维材料的光电探测器件^[38-40],表 2 中总结了基于 2 维材料的各种类型光电探测器性能指标^[41]。可以看出,所有 2 维 APD 外部量子效率都超过 100%,因此,若能够有效解决 2 维材料光吸收系数较低的技术瓶颈,并且实现与表面等离激元结构的技术融合^[42],由 2 维层状材料以及范德华异质结构构成的雪崩光电探测器将具有非常好的技术前景。

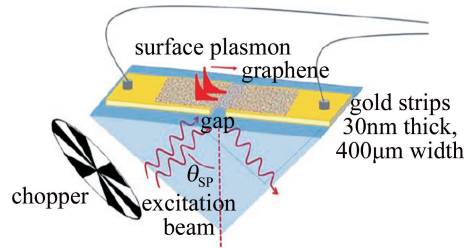


图 19 基于石墨烯的光电探测器原理图^[38]

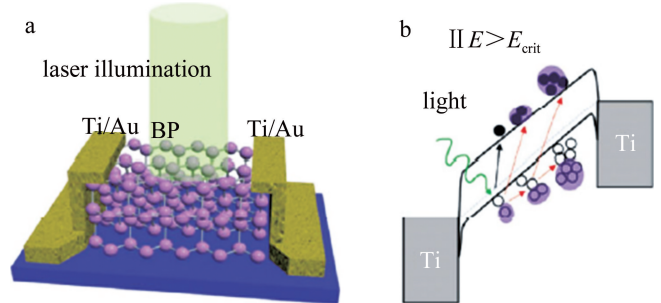


图 20 基于 2 维黑磷 (2-D BP) 光电探测器结构图^[39]

a—APD 结构 b—载流子雪崩过程

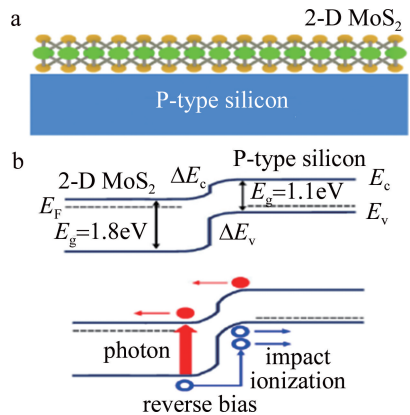


图 21 MoS₂/Si (2-D/3-D) 结构^[40]

a—MoS₂/Si 异质结构界面 b—能带图

表 2 现有 2-D 材料光电探测器的主要性能对比^[42]

| 探测器类型 | 外量子效率/% | 增益 | 响应率/(A · W ⁻¹) | 波长/nm | 工作温度/K |
|------------------------------|---------|-----------------|----------------------------|-----------|--------|
| InSe 雪崩光电二极管 | 11.1 | 152 | 4.86 | 543 | 295 |
| BP 雪崩光电二极管 | 2.719 | 272 | 1.16 | 532 | 295 |
| BP(多层)雪崩光电二极管 | 4.77 | 7 | 2 | 520 | 295 |
| BP/InSe 雪崩光电二极管 | 24.8 | 10 ⁴ | 80 | 4000 | 10~180 |
| MoS ₂ /Si 雪崩光电二极管 | 4.31 | 10 ³ | 2.2 | 633 | 295 |
| InSe 光电二极管 | 0.44 | — | 0.244 | 685 | 295 |
| BP 光电二极管 | 0.0093 | — | 0.0048 | 640 | 295 |
| MoS ₂ 光电二极管 | 0.017 | — | 0.0075 | 450~800 | 295 |
| BP/MoS ₂ 光电二极管 | 0.35 | — | 0.9 | 2500~3500 | 295 |

5 结束语

本文中介绍了在激光和量子领域得到重要应用的单光子探测器,以及典型器件关键技术的突破与发展情况。其中,PMT 器件研究比较充分,已实现商用,以 Hamamatsu 产品为代表的器件类型众多,正在发展先进 PMT 器件;APD 器件包括 Si SPAD、InGaAs/InP SPAD 和 SiPM 等,技术相对成熟,但 Si SPAD 的光谱响应范围和 InGaAs/InP SPAD 的暗计数率等技术难点仍有待改进;SNSPD 器件的光电性能优秀,但需解决低温装置集成化问题;2 维 APD 器件技术前景广阔,仍需开展进一步研究。随着材料制备技术进步和器件结构优化发展,单光子探测器未来将有望获得更高光电性能,实现更为广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] HADFIELD R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12):696-705.
- [2] EISAMAN M D, FAN J, MIGDALL A, *et al.* Invited review article: Single-photon sources and detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(7):071101.
- [3] HAMAMATSU. Photonic device electron tube devices and applied products[M]. Hamamatsu, Japan: Hamamatsu Photonics Electron Tube Division, 2014:3.
- [4] NISHIMURA Y. New 50cm photo-detectors for hyper kamiokande[J]. *Proceeding of Science*, 2017,303:1596831.
- [5] ERTLEY C D, SIEGMUND O, HULL J, *et al.* Microchannel plate imaging detectors for high dynamic range applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(7):1774-1780.
- [6] LYASHENKO A V, ADAMS B W, AVILES M, *et al.* Performance of large area picosecond photo-detectors(LAPPDTM)[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserach*,2020,A958:162834.
- [7] LEHMANN A, BÖHM M, MIEHLING D, *et al.* Recent progress with microchannel-plate PMTs[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2020, A952:161821.
- [8] ACERBI F, GUNDACKER S. Understanding and simulating SiPMs[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926:16-35.
- [9] GHIONI M, GULINATTI A, RECH I, *et al.* Progress in silicon single-photon avalanche diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(4):852-862.
- [10] ZHANG J, ITZLER M A, ZBINDEN H, *et al.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. *Light Science & Applications*, 2015, 4(1):381-393.
- [11] GHIONI M, ARMELLINI G, MACCAGNANI P, *et al.* Resonant-cavity-enhanced single-photon avalanche diodes on reflecting silicon substrates[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(6):413-415.
- [12] MA J, ZHOU M, YU Z F, *et al.* High-efficiency and low-jitter silicon single-photon avalanche diodes based on nanophotonic absorption enhancement[J]. *Optica*, 2015,2(11):974-979.
- [13] ZANG K, JIANG X, HUO Y. *et al.* Silicon single-photon avalanche diodes with nano-structured light trapping[J]. *Nature Communications*, 2017,8(1):58-61.
- [14] WARBURTON R E, INTERMITE G, MYRONOV M, *et al.* Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors: Design, modeling, fabrication, and characterization at wavelengths 1310 and 1550nm[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, 60(11):3807-3813.
- [15] MARTINE N J D, GEHL M, DEROSE C T, *et al.* Single photon detection in a waveguide-coupled Ge-on-Si lateral avalanche photodiode[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14):16130-16139.
- [16] VINES P, KUZMENKO K, KIRDODA J, *et al.* High performance planar germanium-on-silicon single-photon avalanche diode detectors[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):012002.
- [17] DUMAS D C, MILLAR R, KIRDODA J, *et al.* High-efficiency Ge-on-Si SPADs for short-wave infrared[C]// *Optical Components and Materials XVI*. San Francisco, USA: SPIE, 2019:1091424.
- [18] PENG B, ZHANG Y H, SHEN W Z. Infrared single photon detector based on optical up-converter at 1550nm[J]. *Scientific Report*, 2017, 7(1):15341.
- [19] WIDARSSON M, HENRIKSSON M, MUTTER P, *et al.* High resolution and sensitivity up-conversion mid-infrared photon counting LiDAR[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(8):2365-2369.
- [20] ITZLER M A, JIANG X D, ENTWISTLE M, *et al.* Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors[J]. *Journal of Modern Optics*,2011, 58(3/4):174-200.
- [21] MENG X, TAN C H, DIMLER S, *et al.* 1550nm InGaAs/InAlAs single photon avalanche diode at room temperature[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19):174-200.
- [22] XIE S, ZHANG S, TAN C H. InGaAs/InAlAs avalanche photodi-

- ode with low dark current for high-speed operation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16):1745-1748.
- [23] SEO H S, PARK S H, KWAK S, *et al.* A model for the InGaAs/InP single photon avalanche diodes with multiple-quantum wells in the charge multiplication region[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2018, 72(2):289-293.
- [24] FANG Y Q, CHEN W, AO T H, *et al.* InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550nm[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8):083102.
- [25] SONG H Z. Avalanche photodiode focal plane arrays and their application in laser detection and ranging[J/OL]. [2018-11-05]. http://www.researchgate.net/publication/330-938883_Avalanche_photodiode_Focal_Plane_Arrays_and_Their_Application_to_Laser_Detection_and_Ranging.
- [26] GOLLA A, ACERBI F, CAPASSO M, *et al.* NUV-sensitive silicon photomultiplier technologies developed at fondazione bruno kessler[J]. Sensors, 2019, 19(2):308.
- [27] GUO L H, CHEN P, LI L L. Research progress on key technologies of photomultiplier tubes[J]. Vacuum Electronics, 2020, 347(4):1-13 (in Chinese).
- [28] PIEMONTE C, FERRI A, GOLLA A, *et al.* Characterization of the first FBK high-density cell silicon photomultiplier technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(8):2567-2573.
- [29] ACERBI F, PATERNOSTER G, GOLLA A, *et al.* High-density silicon photomultipliers: Performance and linearity evaluation for high efficiency and dynamic-range applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2018, 54(2):4700107.
- [30] YOU L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information[J]. Nanophotonics, 2020, 9(9):2673-2692.
- [31] ROSEFJORD K M, YANG J, DAULER E A, *et al.* Nanowire single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating[J]. Optics Express, 2006, 14(2):527-534.
- [32] ZHANG W J, YOU L X, LI H, *et al.* NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550nm wavelength operational at compact cryocooler temperature[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2017, 60(12):31-40.
- [33] HU P, LI H, YOU L X, *et al.* Detecting single infrared photons toward optimal system detection efficiency[J]. Optics Express, 2020, 28(24):36884-36891.
- [34] MIAO J Sh, ZHANG L, WANG Ch, *et al.* Black phosphorus electronic and optoelectronic devices[J]. 2D Materials, 2019, 6(3):32003.
- [35] LIU Y, HUANG Y, DUAN X F. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials[J]. Nature, 2019, 567(7748):323-333.
- [36] MIAO J Sh, HU W D, GUO N, *et al.* High-responsivity graphene/InAs nanowire heterojunction near-infrared photodetectors with distinct photocurrent on/off ratios[J]. Small, 2015, 11(8):936-942.
- [37] HUANG M, WANG M, CHEN C, *et al.* Broadband black-phosphorus photodetectors with high responsivity[J]. Advanced Materials, 2016, 28(18):3481-3485.
- [38] MALEKI A, COUTTS D W, DOWNES J E, *et al.* Graphene photodetector enhanced by plasmonic coupling[C]//Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). New York, USA: IEEE, 2017:1-4.
- [39] GAO A Y, LAI J W, WANG Y J, *et al.* Observation of ballistic avalanche phenomena in nanoscale vertical InSe/BP heterostructures[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(3):217-222.
- [40] LOPEZ-SANCHEZ O, DUMCENCO D, CHARBON E, *et al.* Avalanche photodiodes based on MoS₂/Si heterojunctions[J/OL]. [2014-11-12]. <https://arxiv.org/abs/1411.3232>.
- [41] MIAO J Sh, WANG C. Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials[J]. Nano Research, 2020, 14(6):1878-1888.
- [42] WU P P, FU Y Q, YANG J. Graphene photodetectors based on surface plasmons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7):0700002 (in Chinese).