

激光与光电子学进展

硅光电倍增管在辐射探测领域中的应用进展

件欣杰, 叶海福*, 艾杰, 张也平

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621000

摘要 光子探测技术在高能物理、天体物理、医学成像等学科领域中扮演着重要的角色。特别是在辐射探测应用中, 实现单光子高水平的灵敏探测一直是近几十年以来光电探测器发展的最终目的。硅光电倍增管(SiPM)技术作为理想固态光子探测器研究领域前所未有的尝试, 凭借其出色的性能(增益高、偏置电压低、时间响应快速、对磁场不敏感等), 吸引着越来越多研究者的关注。围绕 SiPM 的结构原理, 回顾、分类、总结了 SiPM 在结构、性能及应用等方面近年来取得的研究进展。

关键词 硅光电倍增管; 辐射探测; 雪崩光电二极管; 综述

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2100004

Application Progress of Silicon Photomultiplier in Radiation Detection

Wu Xinjie, Ye Haifu*, Ai Jie, Zhang Yeping

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, Sichuan, China

Abstract Photon detection technology plays an important role in high-energy physics, astrophysics, medical imaging and other disciplines. Especially in radiation detection applications, it has been the ultimate goal of photodetector development in recent decades to achieve high-level sensitive detection of single photons. Silicon photomultiplier (SiPM) technology is an unprecedented attempt in the field of ideal solid-state photon detectors. With its excellent performance (high gain, low bias voltage, fast time response, magnetic field insensitivity, etc.), SiPM technology is attracting more and more researchers' attention. Focusing on the structure principle of SiPM, this paper reviews, classifies and summarizes the research progress of SiPM in the aspects of structure, performance and application in recent years.

Key words silicon photomultiplier; radiation detection; avalanche photodiode; review

1 引 言

近年来, 硅光电倍增管(Silicon photomultiplier, SiPM)技术的发展令人兴奋。特别是在用于检测低强度光脉冲的仪器设备中, 成本更低、坚固耐用的 SiPM 已经逐步取代光电倍增管(Photomultiplier tube, PMT)。PMT 在经受光源辐照后, 将电子从光阴极打入真空, 再经过多个打拿极(dynode)逐级倍增后输出信号。SiPM 则利用光子, 使电子从价带提升至导带以得到新电子-空穴对, 再经电场加速循环碰撞后, 形成倍增电流。二者相比, SiPM 通常需要更少的能量。常见的光子探测器还有微通道板光电倍增管(MCP-PMT)、超导纳米线单光子探测器(Superconducting

nanowire single photon detector, SNSPD)、过渡边缘传感器(Transition edge sensors, TESs)等^[1-3]。MCP-PMT 与 PMT 原理类似, 也是一种真空管, 利用微通道代替打拿极来使电子倍增, 虽然时间响应速度快、噪声低, 但是需要几 kV 工作电压且不可避免地存在漏气的风险^[3]。SNSPD 和 TESs 是典型的基于低温的光子探测器, 具有非常高的检测效率、非常低的暗计数率和非常低的时序抖动, 需要配合多级低温恒温器使用。这些特性使 SiPM 在核医学和高能物理实验等方面的应用中成为最佳选择, 如构建超小型探测器、集成信号读出及处理功能为一体的辐射探测设备^[4-9]。

在此背景下, 本文从 SiPM 的发展历程出发, 围绕 SiPM 微单元单光子雪崩二极管的工作原理, 介绍了

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-07; 录用日期: 2022-06-01

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金

通信作者: *yehaifu@caep.cn

SiPM 的基本原理及重要的特性参数。着眼于 SiPM 在辐射探测领域的应用,重点分析了中子探测器和正电子发射型计算机断层显像(PET)技术等其他应用的最新进展,并对未来 SiPM 关键技术的发展进行了总结和展望。

2 SiPM 的发展与研究现状

1940 年,美国贝尔实验室 Ohl 观察到光照射入硅棒后产生的光伏现象,硅基 PN 结的概念被首次提出^[10]。由此,现代意义的光子探测技术发展拉开序幕。随后,以 PN 结为原型结构的 PIN 光电二极管被研制出来。虽然在操作使用中简单可靠,但由于其没有内部增益,在应用中必须使用电荷灵敏前置放大器和低带宽滤波放大器。其中漏电流和二极电容的存在无疑加大了噪声对弱光探测的影响。20 世纪 50 年代,McKay^[11]提出基于硅基 PN 结的雪崩击穿原理,为光电探测技术的发展提供了一个全新的研究方向。1957 年,德国西门子公司制造了世界上首个雪崩倍增器件,并测得了雪崩击穿模式的 $I-V$ 响应曲线。1964 年,Shockley 实验室 Haitz 研究团队提出了响应单个光子的雪崩光电二极管(Avalanche photodiode, APD)^[12],并对 APD 线性工作模式和盖革工作模式的物理机理模型进行大量的研究与分析。研究发现,APD 的雪崩噪声过大,导致难以实现高探测效率,且“死区时间”过长,造成无法分辨多光子响应。APD 阵列化结构成为解决此问题的一个重要研究方向。同时,Shubin 等对金属-绝缘层-半导体(Metal-insulator-semiconductor, MIS)结构的研究表明,负反馈雪崩现象的自淬灭过程可以有效降低 APD 的噪声、缩短“死区时间”,进而有效改善 APD 的探测效率^[13]。基于以上的基础研究成果,20 世纪 90 年代 Golovin 和 Sadygov 等提出了多像素结构的新光电探测器——SiPM^[14]。该模型为当前 SiPM 在各领域应用表现出的巨大潜力奠定了关键基础^[14-16]。SiPM 的关键技术发展历程如图 1 所示。

自 21 世纪以来,伴随半导体制造工艺水平的快速发展,无论是 SiPM 的关键技术还是 SiPM 商业化产品均取得了不错的成绩。以 SiPM 器件结构发展为例,韩国科学技术院设计了一种新型 P-on-N 结构 SiPM 用于蓝光探测。该结构以先注入深 N 阱再注入浅 P⁺阱的方式形成 PN 结,从而确定了 SiPM 的有源面积和击穿电压 V_{BR} 。但由于 PN 结中的无效电场分布,该器件总体上表现出相对较低的光子探测效率(Photon detection efficiency, PDE)和相对较高的暗计数率(Dark counting rate, DCR)^[22]。随后通过改变快速热处理(RTP)条件和用于结形成的离子注入条件,反向电流降低,击穿电压降低了近 20%,并且蓝光状态下的 PDE 提高了近 2 倍^[23]。为提高填充因子,文献[24]提出了一种新 Mini SiPM 结构,将相邻的单光子雪崩二极管(SPAD)放置在单个底层深 N 阱中^[25],以实现

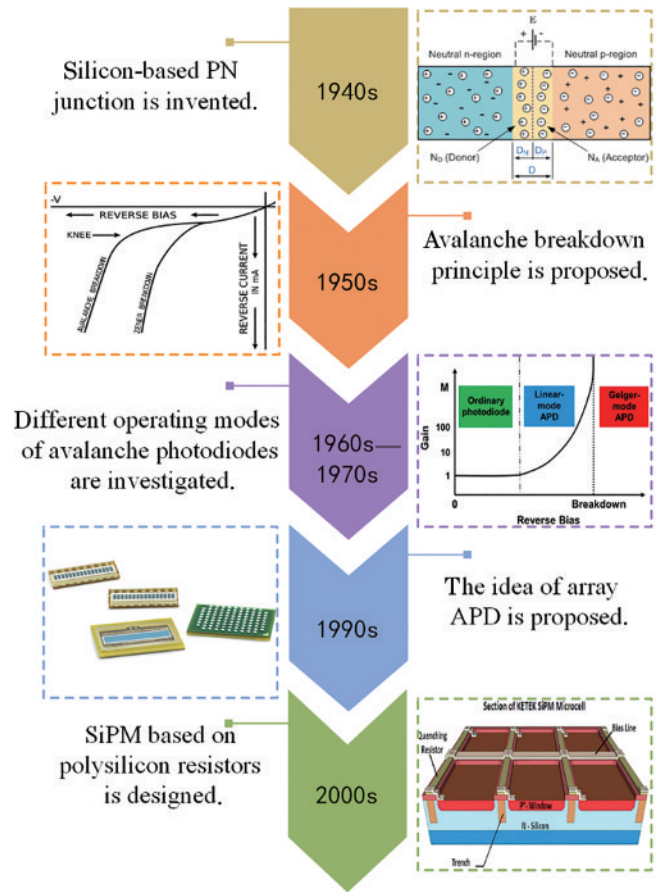


图 1 SiPM 的关键技术发展历程^[17-21]

Fig. 1 Key technology development history of SiPM^[17-21]

阴极共享。新加坡科技研究局使用垂直硅淬灭电阻替代传统多晶硅电阻,在保证高阻值的同时提高了 SiPM 的填充因子,从而实现更有效的光子检测^[26]。此外,意大利布鲁诺·凯斯勒基金会(Fondazione Bruno Kessler, FBK)提出了高密度 RGB-SiPM 结构,各微单元之间设置比外延层厚度更深的沟槽,以完全隔离微单元^[27]。深沟槽使高电场区域边缘与沟槽中心的距离减小至 $2\ \mu\text{m}$,使得几何填充因子显著提升。不仅如此,国内的各科学研究团队也在 SiPM 器件结构上取得了巨大的突破。北京师范大学核科学与技术学院新器件实验室提出采用外延淬灭电阻代替传统位于探测器表面的多晶硅淬灭电阻方法,研制了外延电阻淬灭型硅光电倍增管(EQR SiPM),大大减小了表面电阻材料对光的吸收与遮挡,增大了光敏区间,实现了填充因子与探测效率的最大化^[28-29]。武汉光电国家研究中心发现了 SiPM 在结边缘的局部集中高电场可能会受到局部击穿条件的影响,提出了用浅沟槽隔离(STI)方法消除结构边缘掺杂浓度的不连续性^[30]。新型 SiPM 结构的横截面示意图如图 2 所示。

目前,在全球范围内, SiPM 产品日渐成熟,延续高探测效率的同时,在光敏面积、暗噪声、温度稳定性等方面有了极大的改善,其性能基本满足各个领域的应用需求。以光敏面积为 $3\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 的 SiPM 产品为

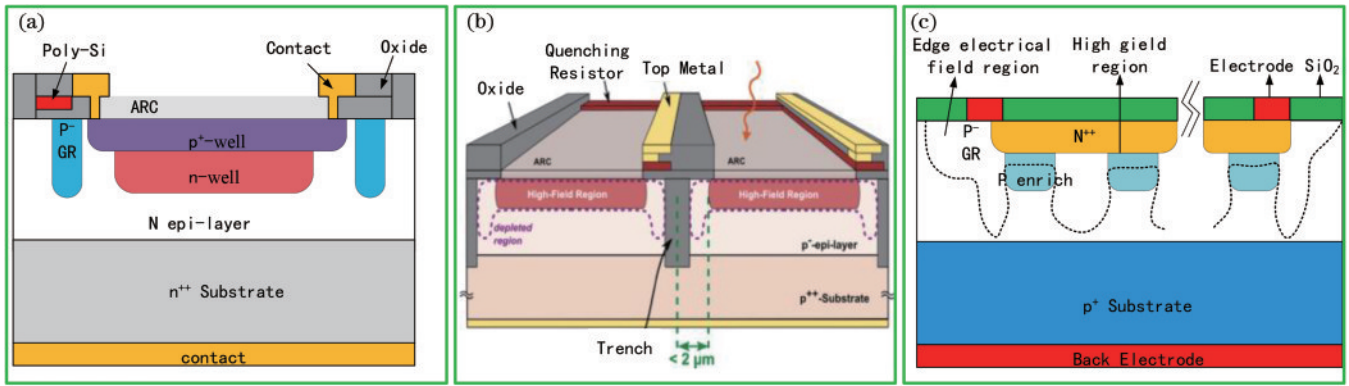


图2 新型 SiPM 结构的横截面示意图。(a) P-on-N 结构^[22];(b) RGB-SiPM 结构^[27];(c) EQR SiPM 结构^[29]




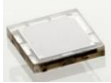

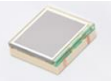
Fig. 2 Schematic diagrams of the cross-section of new SiPM structures. (a) P-on-N structure^[22]; (b) RGB-SiPM structure^[27]; (c) EQR SiPM structure^[29]

例,全球部分知名生产商的 SiPM 产品性能参数对比如表 1 所示。其中,湖北京邦科技公司 TN3050 系列 SiPM 阵列光谱响应波长范围为 250~950 nm,增益可达 2.7×10^6 ,具备超高响应速度,脉冲上升时间低至 0.88 ns^[31]。安森美半导体(ONSEMI)C 系列的 SiPM

具有出色的温度稳定性,约为 $21.5 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$ ^[33]。博通(BROADCOM)公司 AFBR 系列的 SiPM 通过 30 μm 的微像素间距和高达 9815 个像素单元实现整体结构的高几何效率。在 25 $^\circ\text{C}$ 下,其峰值响应波长为 420 nm,探测效率可达 54% 并同时实现 3.2×10^6 的增益^[35]。

表 1 全球部分 SiPM 研究机构及知名生产公司 SiPM 产品一览^[31-36]

Table 1 List of SiPM products of some SiPM research institutions and well-known production companies in the world^[31-36]

Model						
	Joinbon JSP-TN3050-SMT	AdvanSiD ASD-RGB3S-P	First sensor SiPM-NUV3S- SMD	ONSEMI (SENSL) C-series	BROADCOM AFBR-S4N33C013	Hamamatsu S13360- 3025PE
Microcell size	50 μm	40 μm	40 μm	35 μm	30 μm	25 μm
Gain	2.7×10^6	2.7×10^6	3×10^6	3×10^6	3.2×10^6	7×10^5
Temperature dependence of V_{BR}	$34.4 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$	$27 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$	$26 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$	$21.5 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$	$26 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$	$54 \text{ mV} \cdot \text{C}^{-1}$
Spectral range	250-950 nm	350-900 nm	350-900 nm	300-950 nm	300-900 nm	320-900 nm
PDE	32%@420 nm	32.5%@550 nm	43%@420 nm	41%@420 nm	54%@420 nm	25%@420 nm

3 SiPM 原理

3.1 SPAD 工作原理

SiPM 由成百上千个相同的 SPAD 构成,基于雪崩倍增原理实现内部增益。SPAD 本质上可以看作一个 PN 结,其产生的电场强度随施加的偏置电压的增大而增大。当偏置电压过低时,生成的电子-空穴对不会产生额外的倍增。增大偏置电压使得撞击光子生成的电子获得足够的能量,可以通过电离撞击生成二次电子-空穴对,获得较大的倍增。当偏置电压进一步增大直至高于击穿电压 V_{BR} 时,空穴与电子均将获得足够的能量。此时,耗尽层中的单个载流子在强大的电场环境下可以持续发生雪崩现象。一般可以采用串联淬灭电阻降低电流(被动淬灭)或直接降低偏置电压直至低于击穿电压(主动淬灭)的方法来控制雪崩结束。因

此,根据两端施加偏置电压的大小,可将 SPAD 分为 3 个工作区间,分别是光电二极管区间、雪崩光电二极管区间和 SiPM 区间,如图 3 所示。

3.2 SiPM 结构

SiPM 也称为模拟 SiPM,基于 SPAD 同串联的淬灭电阻形成并联阵列,SiPM 的输出信号是多个 SPAD 雪崩信号的叠加。传统的 SiPM 架构及电路阵列模型如图 4 所示。SiPM 的并联阵列结构克服了 SPAD 无法从输出信号中确定有多少光子被探测的缺陷。SiPM 的输出信号直接对应探测到的光子数量,因为每个微单元探测到大于一个光子的可能性很小。目前为增大动态响应范围,单个通道尺寸一般在 10~100 μm ^[37-38]。

虽然目前模拟 SiPM 凭借其成熟的生产工艺技术,在未来数字 SiPM(Digital SiPM,DSiPM)

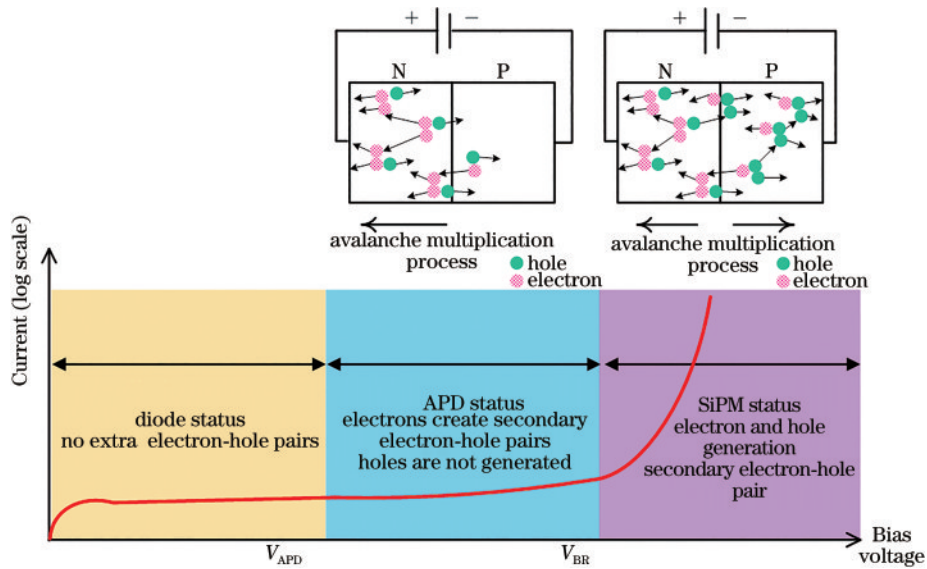


图 3 SPAD 的 3 种工作模式解析图

Fig. 3 Analysis diagram of three working modes of SPAD

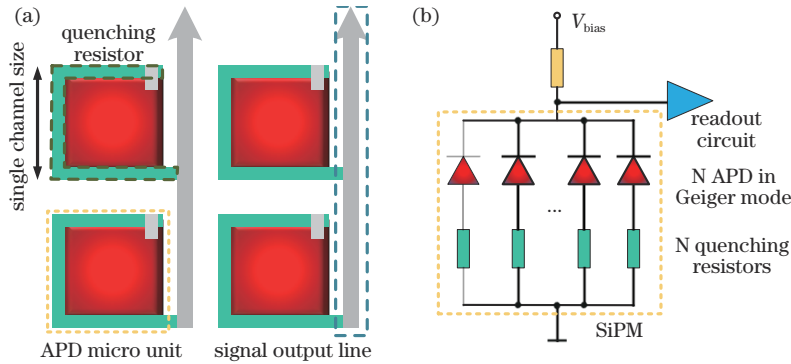


图 4 SiPM 示意图。(a)传统 SiPM 结构；(b)SiPM 电路阵列结构

Fig. 4 Schematic of SiPM. (a) Traditional SiPM structure; (b) SiPM circuit array structure

可能是最终的赢家。DSiPM 的电路结构如图 5 所示^[39]。作为传统 SiPM 结构的升级,DSiPM 通过将每个微单元直接集成至电子设备,使得电子设备主动淬灭击穿并产生二进制信号,再将数字信号传输到片上计数器和时间数字转换器(TDC)。与传统的 SiPM 相比,DSiPM 具备更好的时序性能和更快的充放电性能。

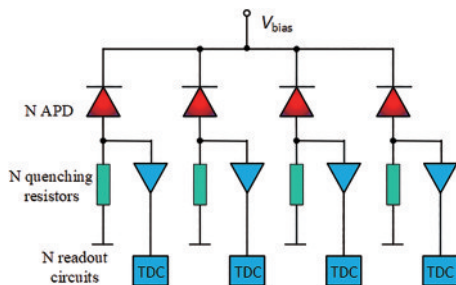


图 5 DSiPM 电路结构模型^[39]

Fig. 5 DSiPM circuit structure model^[39]

3.3 重要参数及特性分析

为了在各应用中实现 SiPM 的最佳性能,需要对

SiPM 的重要参数及特性进行定性描述和理解,如探测效率、光学串扰、暗计数率、温度依赖性。图 6 描述了各参数之间的关联性。

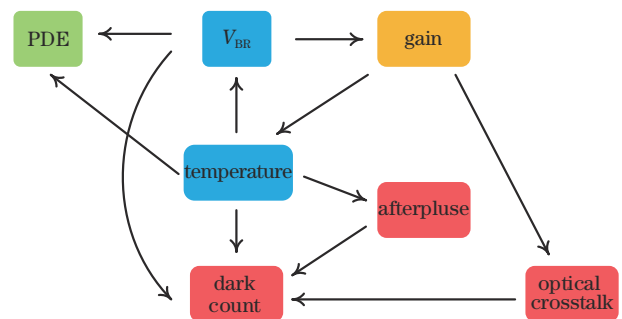


图 6 SiPM 主要特性参数关系网络

Fig. 6 Relationship network of main characteristic parameters of SiPM

击穿电压 V_{BR} 代表 SiPM 中的击穿电压,是导致雪崩倍增的最小反向偏置电压,也是最重要的参数之一,决定了 SiPM 的增益、PDE 等其他参数。击穿电压主要取决于微单元的 PN 结的掺杂分布,掺杂分布决定

了电场强度和分布^[40]。图 7(a)描述了 SiPM 在不同强度的光照条件下测试的伏安(I - V)特性曲线^[41]。其中, LED-1 代表的光照强度最弱, LED-9 代表的光照强度最强。 I - V 特性曲线计算后得到的导数如图 7(b)所示。在不同光照强度条件下, 导数的最大值对应的偏置电压几乎不变, 显然 V_{BR} 与光照强度无关。

另一个重要参数是 PDE, 它衡量了 SiPM 感知光子的能力, 与光子波长和 SiPM 的偏置电压息息相关。PDE(E_{PD}) 由量子效率、雪崩触发概率和几何填充因子 3 部分量化, 其表达式为

$$E_{PD} = E_Q \times P_T \times F_{eff}, \quad (1)$$

式中: E_Q 为量子效率, 表征了光子在硅中被吸收并产生电子-空穴对的概率; P_T 为雪崩触发效率, 取决于电场, 即过电压和产生载流子的位置; F_{eff} 为填充因子, 与 SiPM 的布局 and 微像素的内部结构密切相关。来自不同生产厂商的 SiPM 在光子波长为 410 nm 处的 PDE 与过电压 V_{OV} 的变化关系如图 8 所示^[42]。当 V_{OV} 超过 5 V 时, SiPM 的 PDE 逐渐趋于稳定, FBK 和日本滨松公司 (HPK) 的 SiPM 的最佳 PDE 均可超过 60%。

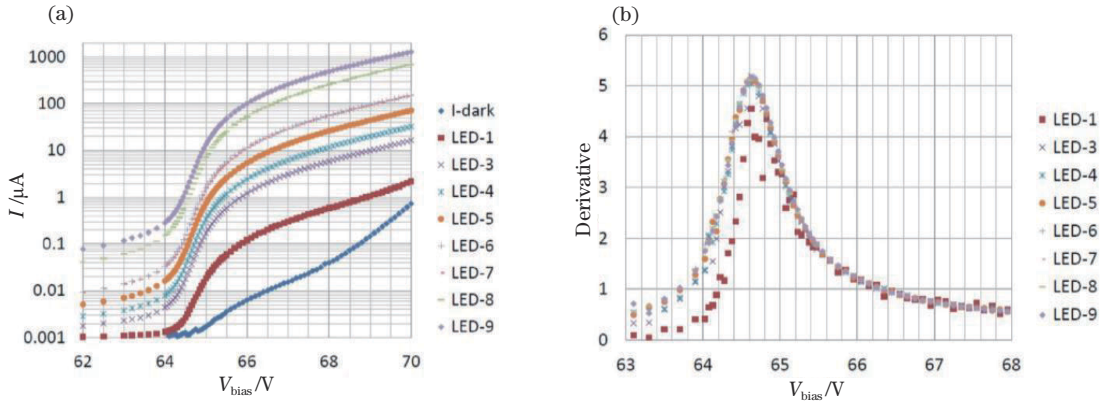


图 7 不同光照条件下 SiPM 电学测试结果图^[41]。(a) I - V 特性曲线; (b) I - V 特性曲线导数分布

Fig. 7 SiPM electrical test results under different light conditions^[41]. (a) I - V characteristic curves; (b) derivative distribution of I - V characteristic curves

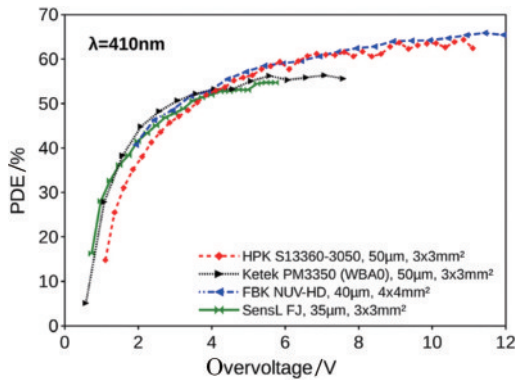


图 8 不同厂商 (HPK、Ketek、FBK 和 SensL) 生产的 SiPM 在波长为 410 nm 处的过电压与 PDE 的函数关系^[42]

Fig. 8 Function of overvoltage and PDE of SiPM produced by different manufacturers at wavelength of 410 nm (HPK, Ketek, FBK and SensL)^[42]

同时, SiPM 也存在许多可能影响其性能的非理想因素。SiPM 的噪声包括主要噪声源和相关噪声源 2 种, 它们的波形图及来源如图 9 所示。主要噪声源是指在无光照条件下, 由热搅动或其他因素随机产生的电子-空穴对和载流子触发雪崩倍增效应, 导致电流脉冲输出。暗计数率 (DRC) 用于表征该信号的频率。相关噪声源包括即时串扰、延迟串扰和外部串扰。初级雪崩效应产生的光子直接穿越到相邻的 SPAD 并触

发次级雪崩, 从而引起即时串扰。即时串扰通常发生在初始雪崩发生的几百 ps 之后, 很难在波形图上准确测试。延迟串扰是由于二次雪崩产生的光子被邻近的 SPAD 未耗尽层吸收, 并扩散到 SPAD 的倍增区域而产生雪崩效应。该过程的发生需要一定的时间, 通常可与主信号区分开, 如图 9 所示。外部串扰的产生是由于初级雪崩效应产生的光子经外部闪烁体或保护窗的反射回到 SPAD^[43]。

此外, SiPM 还具有很强的温度依赖性。当温度升高时, PN 结需要更强的电场激发雪崩, 击穿电压 V_{BR} 增大。SiPM 的增益会因温度升高而减小 (SiPM 的过电压 V_{OV} 减小)。 V_{BR} 的典型温度变化因子为 40~60 mV/°C, 增益变化率为 -0.5~-1 %/°C。SiPM 在宽温度域的应用通常需要额外的校准技术补偿增益漂移。最常见的是偏置电压直接补偿技术。通过实时测量温度的变化并相应地修正 SiPM 的偏置电压, 维持 SiPM 过电压 V_{OV} 的稳定, 从而使 SiPM 的增益保持相对恒定。在此基础上, 中国科学院上海应用物理研究所研发了一款实现增益漂移校正的电源模块, 对 5~40 °C 范围内 ²⁴¹Am γ 能谱全能峰增益漂移的测试结果 (校正前为 87.3%, 校正后为 2.76%) 验证了电压补偿对稳定增益的效果^[44]。

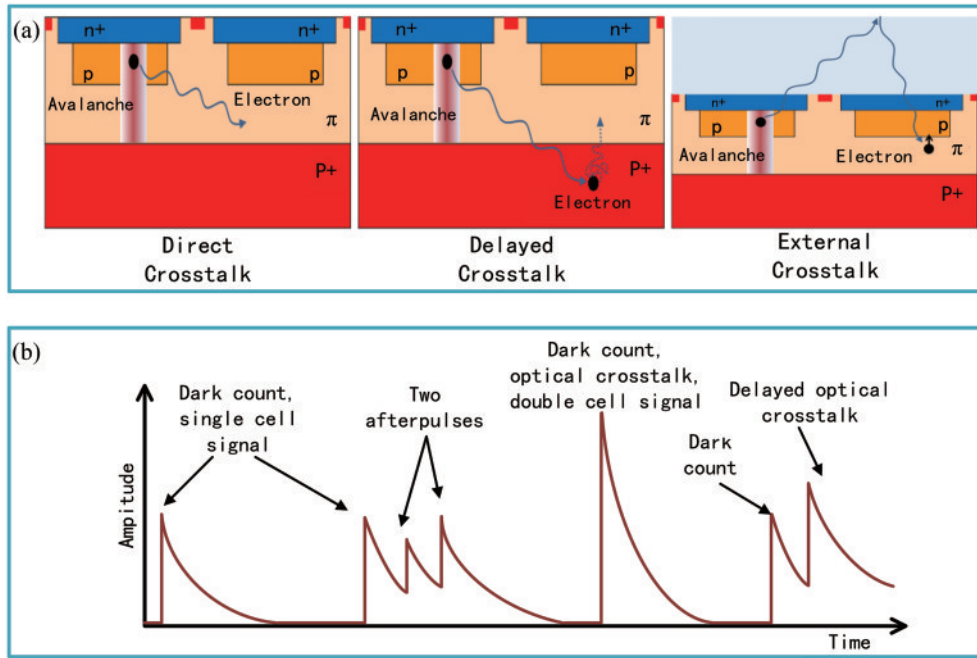


图 9 SiPM 噪声示意图。(a) SiPM 噪声来源；(b) 噪声波形图^[42-43]

Fig. 9 SiPM noise schematics. (a) Schematic diagram of noise source; (b) noise waveform of SiPM^[42-43]

3.4 前端电子学系统

前端电子学在各应用中为最大程度发挥 SiPM 的特性和优点起到重要作用。不适合的前端电子读出电路将限制 SiPM 的性能。例如,在高密度的 SiPM 阵列应用中,使用成熟的单个读出理想电路是不切实际的。若采用多路合成技术降低读出通道数,一方面会降低信号读出速度,另一方面光子时间分辨率会因电子噪声叠加增大而降低,从而限制了时间精度的准确性。

为满足集成度和性能的需求,目前最常见的 SiPM 前端读出电路采用时间分辨率和空间分辨率较高的专用集成电路(Application specified integrated circuit, ASIC),一般分为电压模式读出和电流模式读出 2 种。电压模式读出方式如图 10(a)所示, SiPM 产生的电流脉冲通过电阻 R_{IN} 及电压放大器输出适当幅度的电压输出信号,再经由积分器进行能量测量或比较器进行时间测量。通常,为实现对时间性能的良好评估,需要采用具有大带宽的放大器以实现较快的时间上升沿的信号输出。然而,在实际使用中,过大的输入电阻 R_{IN} 会导致噪声性能的恶化,且功耗也随增益带宽积的增大而增大。因此,电压模式读出电路适用于输入信号的动态范围较大、增益放大倍数较低和时间精度不敏感等情况。而在电流模式输出电路中, SiPM 产生的电流信号通过电流缓冲,按不同比例放大或缩小,即建立不同的“快”和“慢”信号路径,分别对能量测量和时间测量进行了优化^[43]。电流模式输出电路避免了高阻抗节点,更容易实现大带宽和高精度时间分辨率。根据工艺、动态范围、单通道功耗的差异,表 2 总结了近年出现的不同类型的 ASIC 前端读出电路。

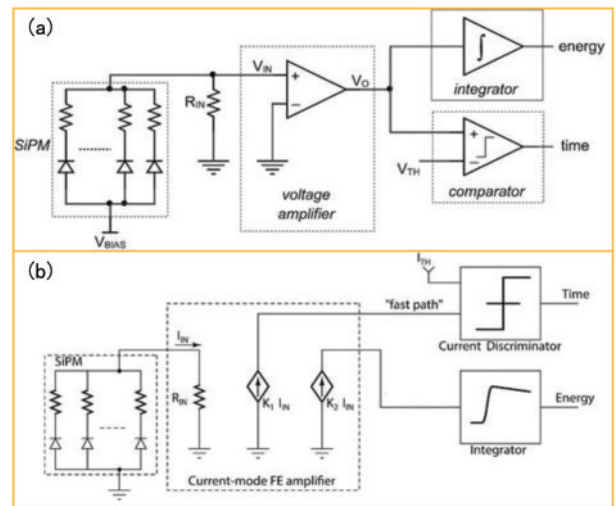


图 10 SiPM 专用集成电路^[45]。(a) 电压模式读出；

(b) 电流模式读出

Fig. 10 SiPM ASIC schematics^[45]. (a) Voltage mode readout;

(b) current mode readout

4 SiPM 在辐射探测领域的应用

近年来,人们对 SiPM 的研究越发深入,图 11(a)收集、分类、总结了 SiPM 在各领域学科的应用现状,主要包括辐射探测、正电子发射断层扫描、生物成像技术、空间粒子辐射等。图 11(b)是过去 20 年间在辐射探测领域有关 SiPM 和 PMT 应用的公开文献数量统计图。其结果表明,近 10 年有关 SiPM 的研究数量大幅度增长,研究热度接近甚至超越了 PMT。

4.1 中子探测器

中子没有电荷,即使在高密度金属中也能穿透得很

表 2 ASIC 前端读出电路汇总
Table 2 ASIC front-end readout circuit summary

Reference	[46]	[47]	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	[53]	[54]
ASIC	EASIROC	SCGA	STiC	HRFlexToT	TOFPET2	KLauS	kintex-7	FSCA	CITIROC
Number of channels	32	2	64	16	64	36	16	64	32
Technology	350 nm	350 nm	180 nm	180 nm		180 nm	180 nm	65 nm	350 nm
Power per channel	<5 mW	<3 mW		3.5 mW	3.6-7.2 mW	3.3 mW	3.89 mW	2.1 mW	
Dynamic range	160-320 pC	200 fC-25 pC	20 pC		1500 pC		200-800 pC		160 fC-320 pC
Time resolution			50.2 ps	10 ps	30 ps	200 ps		422.3 ps	

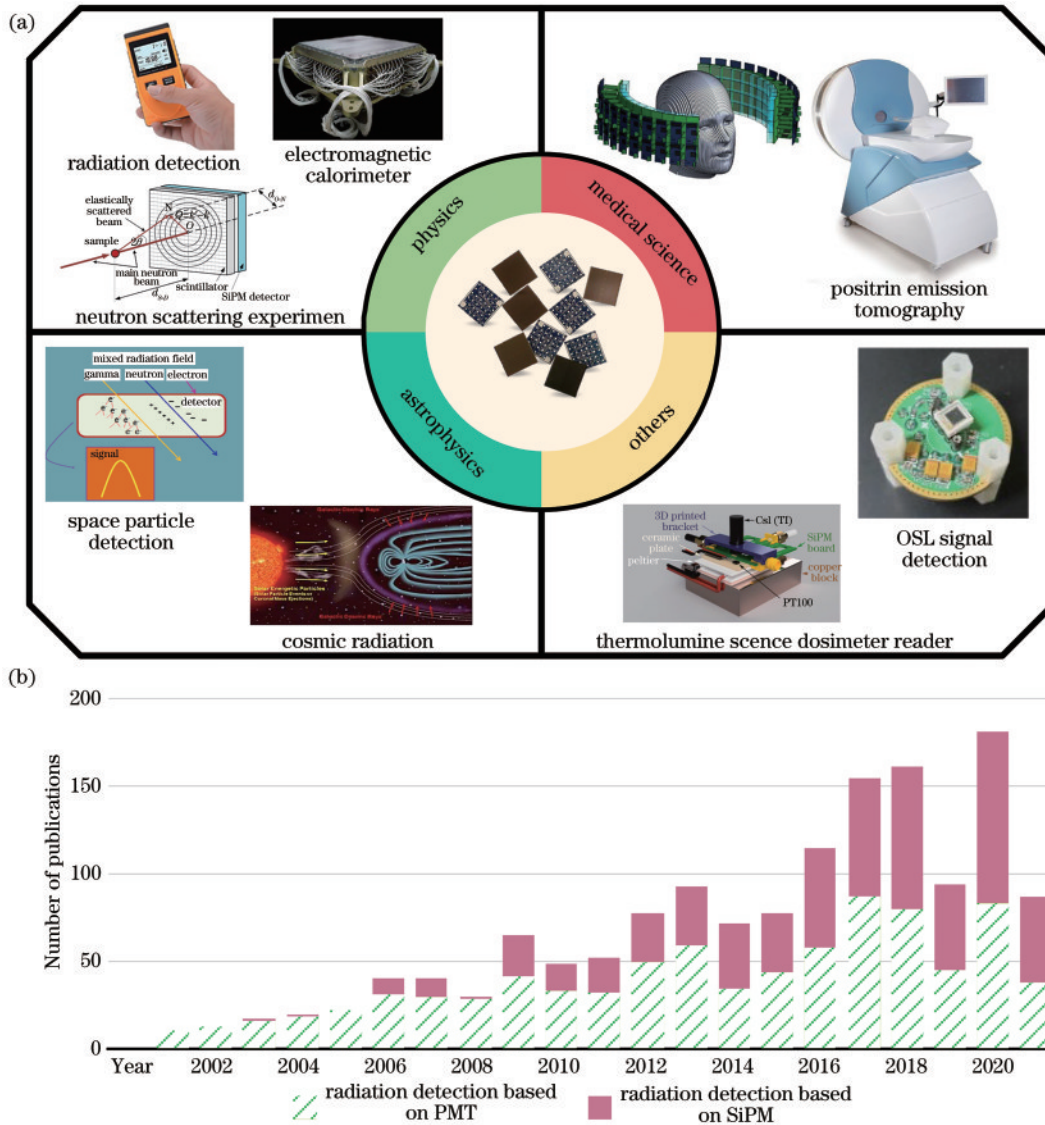


图 11 SiPM 的研究现状。(a) SiPM 在各领域的应用；(b) 近 20 年辐射探测领域基于 SiPM 和 PMT 的公开文献统计数量对比
Fig. 11 Research status of SiPM. (a) Application of SiPM in various fields; (b) comparison of statistics of published literature based on SiPM and PMT in the field of radiation detection in the past 20 years

深。相比于其他类型辐射探测,中子探测可用于评估软质和凝聚态物质中的晶格,甚至是磁结构和自旋波等^[55]。中子的探测技术基于中子诱发核反应。在此反

应中,中子被散射原子的原子核俘获,同时产生具有高能级的次级粒子,这些粒子能够通过监测次级带电粒子引起的电离现象实现中子探测。

自 2009 年起,闪烁体中子探测器作为 ^3He 正比计数管的替代品吸引了许多研究者的注意。不同于应用核反应法的 ^3He 正比计数管,闪烁体探测器基于核反冲法。基本分为以下几个接连阶段:首先,粒子进入闪烁体后,使原子或分子被激发和电离;然后,被激发的原子或分子在退激发的过程中,发射为可见光范围的光子,或者能量转换为晶格振动火热运动的能量消耗掉;随后,通过光探测器,将微弱的闪烁光转换为光电子,再经过前置端放大,最终输出一个幅度可被观察的电脉冲信号。使用 SiPM 进行光电探测可以解决 PMT 对磁场灵敏度高、电压要求高等难题。在文献[56]中,研究评估了 SiPM 经冷中子辐照后对击穿电压的影响。实验结果表明,ONSEMI 公司的 SiPM(型号 Series-C ArrayC-30035-144P-PCB)平均

击穿电压从辐照前的 24.9 V 变为辐照后(剂量为 $1.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)的 24.7 V。日本滨松公司的 MPPC(型号 S12642-0808PB-50)辐照前计算的平均击穿电压为 66.7 V,在经过 $6.04 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量辐照后变为 66.2 V。近期,德国 Jülich 研究中心设计了一个有效面积为 $163.5 \text{ mm} \times 163.5 \text{ mm}$ 的基于 SiPM 的闪烁中子探测器。对应于特定测试区域,实现的最大测试效率为 $(96 \pm 0.13)\%$ (同等测试环境下, ^3He 正比计数管的测试效率定为 100%)^[57-58]。文献[59]研究了手持式中子搜索探测器的替代方案,如图 12 所示,该探测器由 ^6Li 玻璃闪烁体与用作光传感器的 SiPM 阵列耦合。测试结果表明,分别对应于 1 mm 和 2 mm 厚的 2 种闪烁体,获得的传感器灵敏度为 $2.2 \text{ counts}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 $2.5 \text{ counts}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

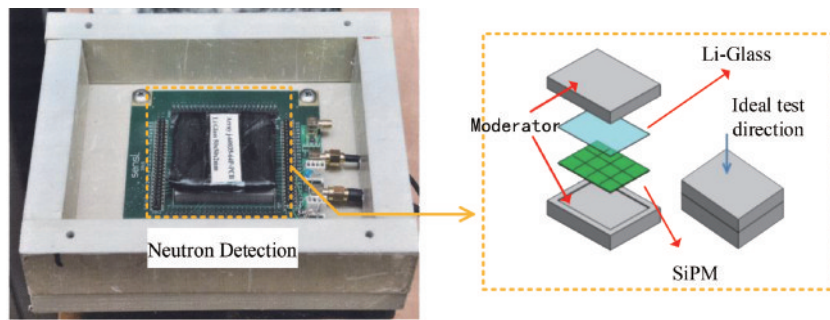


图 12 基于 SiPM 的中子闪烁探测器结构图^[59]

Fig. 12 Structure diagram of SiPM-based neutron scintillation detector^[59]

4.2 正电子发射断层扫描

正电子发射断层扫描(Positron emission tomography, PET)是 1970 年代开发的一种用于观察体内功能过程的医学成像技术,通过引入化学示踪剂来观察特定组织的功能状态,目前已经在癌症影像诊断方面起着至关重要的作用^[60-63]。早期,临床 PET 机器中的标准光电探测器是 PMT,但是 PMT 的大尺寸限制了探测器的空间分辨率^[64]。SiPM 的尺寸微小且对磁场不敏

感,可有效提升 PET 分辨率。飞行时间(Time of flight, TOF)技术为 PET 提供了更高的图像质量,通过更精准地识别从正电子湮灭事件到探测器的距离,提供更明确的诊断信息。一个典型的 TOF-PET 结构如图 13 所示,它由 30 个检测块组成,具有 3840 个通道^[65]。其中,每个检测块由两个探测模块和一个前端模块组成,该前端模块由两个配备专用集成电路和 SiPM 接口的电路板以及一个 ASIC 接口板组成。

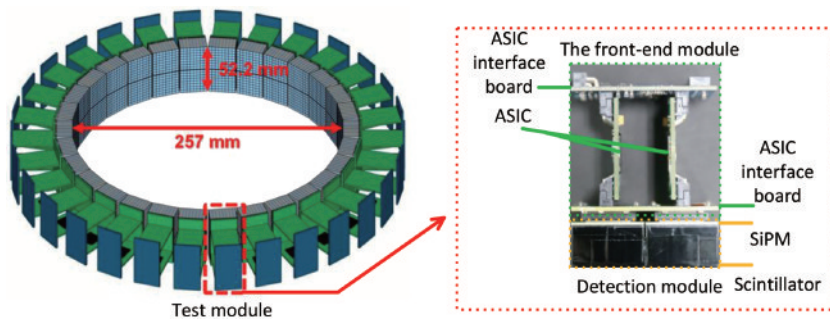


图 13 典型 TOF-PET 单元结构图^[65]

Fig. 13 Typical TOF-PET cell structure diagram^[65]

目前,基于 SiPM 的 PET 应用研究已经产生了喜人的结果。使用分裂激光测量的固有重合定时分辨率大约为 100 ps,证明 SiPM 应用于 TOF-PET 的可行性^[66]。美国宾夕法尼亚大学设计的基于 SiPM 的正电子发射计

算机断层显像(PET/CT)的测量结果表明,其 TOF 分辨率能够达到 210 ps 的半峰全宽(FWHM)(有效平均放射性浓度 $5.3 \times 10^6 \text{ Bq/L}$ 条件下),与最先进的基于 PMT 的扫描仪相比,具有更好的空间分辨率^[67]。

Amirrahedi 等^[68]新研制了一种基于 SiPM 的 PET 扫描仪(Xtrim-PET),专用于小型实验室动物成像。除了紧凑、轻便、易于安装和能量分辨率良好外,Xtrim-PET 还具有合理的性能,适用于基于临床前分子成像的研究。

4.3 其他应用

除了上述应用,Santangelo 等测试了 SiPM 应用于生物传感技术的检测低荧光水平的能力^[69]。分别测试了 DNA 微阵列的干燥样本和实时聚合酶链式反应(PCR)的液体样本的系统线性情况。结果表明,SiPM 比传统的探测器具有更高的灵敏度。在生物发光检测分析中,SiPM 的应用也取得了关键性成果^[69-70],如图 14 所示。文献[70]展示了使用 SiPM 测量水母发光

蛋白质内 Ca^{2+} 的能力。意大利国家研究委员会微电子与微系统研究所(CNR-IMM)测试了基于 SiPM 的发光计的线性度和灵敏度性能,该发光计具有集成的微流体系统,并用于测量源自腺苷三磷酸(ATP)驱动的荧光素氧化的发光^[71]。Miyamoto 等^[72]设计了用于天体粒子物理实验的 256 通道 SiPM 相机,通过 SiPM 实现了低光级灵敏度、ns 数量级的快速响应等高性能。此外,SiPM 阵列在天体粒子物理学的前沿实验中很常见^[72-73]。文献[73]提出了一种基于 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ 和 SiPM 阵列的新型伽马射线探测器,并对其进行了一组放射源(能量范围为 5.9~1332.5 keV)的测试。在 662 keV FWHM 下测试的能量分辨率为 5.3%。

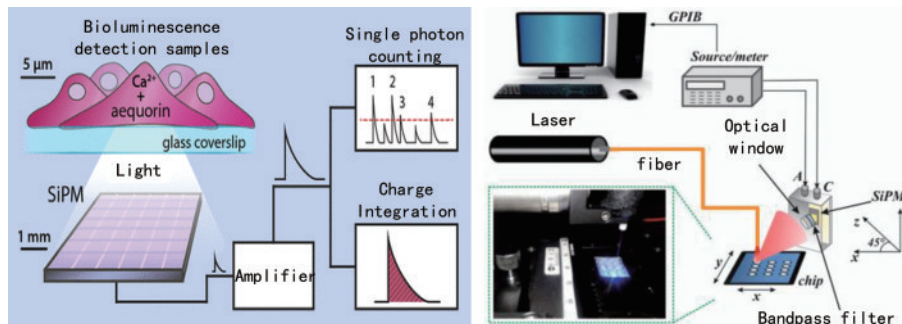


图 14 SiPM 在生物传感荧光探测的应用^[69-70]

Fig. 14 Application of SiPM in biosensing fluorescence detection^[69-70]

5 总结与展望

20 世纪 90 年代快速发展的 SiPM 技术打开了辐射探测领域的新纪元。与 PMT 相比,SiPM 具有更紧密的结构、更低的偏置电压、更高的增益、更好的磁场灵敏度。作为在弱光探测应用中的单光子探测器,SiPM 已经逐步开始取代 PMT,成为在核物理、高能物理试验中的首要选择。以 SiPM 的基本工作原理为基础,展开了重要参数的影响,着重分析论述了近年来 SiPM 在辐射探测方面应用的最新进展。

当前,我国在 SiPM 方面已经具备了一定的技术储备,但是依旧处于发展的黄金上升期。预计未来 SiPM 会朝着高动态范围器件的方向发展。通过研究更高密度的 SPAD 并结合先进的封装技术,使 SiPM 阵列单元之间的死区最小化,在不影响光子探测效率的同时,增加 SiPM 的动态范围。此外,高集成化的 DSiPM 也具有广阔的发展前景。未来可以集成读出电子系统至 DSiPM,也有望利用 DSiPM 实现具有出色时间分辨率的单光子计数技术。

参 考 文 献

- [1] 王江, 罗林保. 基于氧化镱日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1100001.
Wang J, Luo L B. Advances in Ga_2O_3 -based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1100001.
- [2] 林亚楠, 吴亚东, 程海洋, 等. PdSe_2 纳米线薄膜/Si 异质结近红外集成光电探测器[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2125001.
Lin Y N, Wu Y D, Cheng H Y, et al. Near-infrared integrated photodetector based on PdSe_2 nanowires film/Si heterojunction[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2125001.
- [3] 潘京生. 微通道板光子探测器及其时间分辨的影响因素[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1700006.
Pan J S. Microchannel plate photon detector and factors influencing its time resolution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1700006.
- [4] Chae M J, Yoo H S, Kim J Y, et al. Development of a wireless sensor network system for suspension bridge health monitoring[J]. Automation in Construction, 2012, 21: 237-252.
- [5] Buzhan P, Karakash A. Hand-foot monitors for nuclear plants based on scintillator-WLS-SiPM technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1689(1): 012011.
- [6] Roncali E, Cherry S R. Application of silicon photomultipliers to positron emission tomography[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2011, 39(4): 1358-1377.
- [7] Buzhan P, Dolgoshein B, Filatov L, et al. Silicon photomultiplier and its possible applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 504(1/2/3): 48-52.

- [8] 张飞, 赵天琦, 陈义, 等. 基于 SiPM 单光子探测器的荧光光谱仪研究[J]. 应用光学, 2022, 43(2): 278-283.
Zhang F, Zhao T Q, Chen Y, et al. Fluorescence spectrometer based on SiPM single photon detector[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(2): 278-283.
- [9] 万超, 郝浩, 赵清源, 等. 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0500001.
Wan C, Hao H, Zhao Q Y, et al. Application of single photon detection in wireless optical communication transceiver technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0500001.
- [10] Anderson O L. Adhesion of Solids, Principles and applications[J]. Bell Laboratories Record, 1957, 35(11): 441-445.
- [11] McKay K G. Avalanche breakdown in silicon[J]. Phys Rev, 1954, 94(4):877-884.
- [12] Carrano J C, Lambert D, Eiting C J, et al. Single photon avalanche photodiodes[C]//Conference on Optical Fiber Communication-Includes Post Deadline Papers. IEEE, 2009: 924-926.
- [13] Garnier F, Horowitz G, Fichou D. Thin-layer field-effect transistors with MIS structure whose insulator and semiconductor are made of organic materials: US5347144 [P]. 1994-09-13.
- [14] Renker D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 567(1): 48-56.
- [15] Eraerds P, Legré M, Rochas A, et al. SiPM for fast photon-counting and multiphoton detection[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14539-14549.
- [16] 胡晓涛, 郝晓剑, 段向港. 基于原子发射双谱线的温度测量技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100201.
Hu X T, Hao X J, Duan X G. Temperature measurement technology based on double line of atomic emission spectra[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100201.
- [17] McKay K G. Avalanche breakdown in silicon[J]. Physical Review, 1954, 94(4): 877-884.
- [18] Takanashi Y, Horikoshi Y. InGaAsP/InP avalanche photodiode prepared by Zn-diffusion[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(8): 1615-1616.
- [19] Haitz R H. Mechanisms contributing to the noise pulse rate of avalanche diodes[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(10): 3123-3131.
- [20] Sadygov Z, Sadigov A, Khorev S. Silicon photomultipliers: status and prospects[J]. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2020, 17(2): 160-176.
- [21] 李冲, 张东亮, 薛春来, 等. 硅基 IV 族光电器件研究进展(二): 光电探测器[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110002.
Li C, Zhang D L, Xue C L, et al. Progress in the study of Si-based group IV optoelectronic devices (II): photodetectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110002.
- [22] Lim K T, Lee D, Park K, et al. Development of P-on-N silicon photomultiplier prototype for blue light detection [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 12(11): C11006.
- [23] Lim K T, Kim H, Hwang J, et al. Well structure engineering to improve the responsivity of p-on-n SiPM developed at KAIST-NNFC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 914: 25-31.
- [24] Walker R J, Webster E A G, Li J H, et al. High fill factor digital silicon photomultiplier structures in 130nm CMOS imaging technology[C]//2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record, October 27-November 3, 2012, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 1945-1948.
- [25] Pancheri L, Stoppa D. Low-Noise CMOS single-photon avalanche diodes with 32 ns dead time[C]//ESSDERC 2007-37th European Solid State Device Research Conference, September 11-13, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007: 362-365.
- [26] Sun F, Duan N, Lo G Q. Novel silicon photomultiplier with vertical bulk-Si quenching resistors[J]. IEEE Electron Device Letters, 2013, 34(5): 653-655.
- [27] Acerbi F, Paternoster G, Gola 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.
- [28] 李永正, 程岳, 王凯君, 等. 应用于大型高能物理实验的硅光电倍增器(SiPM)及其质量控制研究[C]//第十六届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集(上册). 北京: 中国电子学会, 中国核学会, 2012.
Li Y Z, Cheng Y, Wang K J, et al. Study on silicon photomultiplier (SiPM) and its quality control for Large-scale high-energy physics experiments[C]//Proceedings of the 16th National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology (Volume 1). Beijing: Chinese Nuclear Society, Chinese Institute of Electronics, 2012.
- [29] 刘红敏, 龙金燕, 代雷, 等. 大动态范围外延电阻淬灭型硅光电倍增器[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 535-541.
Liu H M, Long J Y, Dai L, et al. Large dynamic range silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(3): 535-541.
- [30] D'Ascenzo N, Saveliev V, Xie Q. Design and test of SiPM structures in CMOS technology[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, February 27-29, 2016, Rome, Italy. Setúbal: SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2016.
- [31] Joinbon. JSP-TN3050-SMT[EB/OL]. [2021-05-04]. http://www.joinbon.com/Uploads/file/20191126/20191126171114_23598.pdf.
- [32] AdvanSiD. ASD-RGB3S-P[EB/OL]. [2021-05-04]. <https://>

- advansid.com/attachment/get/up_53_1432741078.pdf.
- [33] SensorFirst. SiPM-NUV3S-SMD[EB/OL]. (2016-02-18) [2021-05-04]. https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/SiPM-NUV_5000076-5000079.pdf.
- [34] ONSEMI. C-series[EB/OL]. (2022-02) [2022-05-06]. <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>.
- [35] BROADCOM. AFBR-S4N33C013[EB/OL]. (2022-01-04)[2022-04-05]. <https://docs.broadcom.com/doc/AFBR-S4N33C013-DS>.
- [36] Hamamatsu. S13360-3025PE[EB/OL]. [2022-04-05]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/17500.html>
- [37] Acerbi F, Gola A, Regazzoni V, et al. High efficiency, ultra-high-density silicon photomultipliers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(2): 3800608.
- [38] Wagadarikar A A, Katz S, Ivan A, et al. Performance of low afterpulsing probability multi-pixel photon counters for time-of-flight positron emission tomography[C]//2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC), October 27-November 2, 2013, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2013.
- [39] Lecoq P, Gundacker S. SiPM applications in positron emission tomography: toward ultimate PET time-of-flight resolution[J]. The European Physical Journal Plus, 2021, 136(3): 292.
- [40] Dinu N, Nagai A, Para A. Breakdown voltage and triggering probability of SiPM from IV curves at different temperatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 845: 64-68.
- [41] Gundacker S, Heering A. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector[J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, 65(17): 17TR01.
- [42] 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.
- [43] Piemonte C, Gola A. Overview on the main parameters and technology of modern silicon photomultipliers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 926: 2-15.
- [44] 侯会良, 黄跃峰, 程懋松, 等. 小型智能程控 SiPM 电源设计与验证[J]. 核技术, 2020, 43(6): 84-88.
- Hou H L, Huang Y F, Cheng M S, et al. Design and verification of small intelligent programmable SiPM power supply[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43(6): 84-88.
- [45] Calò P P, Ciciriello F, Petrigiani S, et al. SiPM readout electronics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 926: 57-68.
- [46] Callier S, Taille C D, Martin-Chassard G, et al. EASIROC, an easy & versatile readout device for SiPM [J]. Physics Procedia, 2012, 37: 1569-1576.
- [47] Dorosz P, Baszczyk M, Kucewicz W, et al. Low-power front-end ASIC for silicon photomultiplier[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(4): 1070-1078.
- [48] Shen W, Harion T, Chen H S, et al. A silicon photomultiplier readout ASIC for time-of-flight applications using a new time-of-recovery method[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(5): 1196-1202.
- [49] Sánchez D, Gómez S, Mauricio J, et al. HRFlexToT: a high dynamic range ASIC for time-of-flight positron emission tomography[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2022, 6(1): 51-67.
- [50] Nadig V, Weissler B, Radermacher H, et al. Investigation of the power consumption of the PETsys TOFPET2 ASIC[J]. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2020, 4(3): 378-388.
- [51] Wang W, Shen W, Yuan Z X, et al. Evaluation of the KLauS ASIC at low temperature[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 996: 165110.
- [52] Tang Y X, Townsend T, Deng H, et al. A highly linear FPGA-based TDC and a low-power multichannel readout ASIC with a shared SAR ADC for SiPM detectors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(8): 2286-2293.
- [53] Zhou Y H, Wang Y G, Song Z Q, et al. A low-power ASIC with row-column summing structure for 64-channel SiPM readout[C]//2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, October 31-November 7, 2020, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [54] Monzo J M, Aguilar A, González-Montoro A, et al. PETIROC2 based readout electronics optimization for Gamma Cameras and PET detectors[J]. Journal of Instrumentation, 2017, 12(2): C02059.
- [55] Feigin L A, Svergun D I. Structure analysis by small-angle X-ray and neutron scattering[M]. Boston: Springer, 1987.
- [56] Durini D, Degenhardt C, Rongen H, et al. Evaluation of the dark signal performance of different SiPM-technologies under irradiation with cold neutrons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 835: 99-109.
- [57] Kumar S, Herzkamp M, Degenhardt C, et al. Performance of a position-sensitive neutron scintillation detector based on silicon photomultipliers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(6): 1169-1174.
- [58] Kumar S, Herzkamp M, Durini D, et al. Development of a solid-state position sensitive neutron detector prototype based on ^6Li -glass scintillator and digital SiPM arrays[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 954: 161697.
- [59] Wengrowicz U, Osovitzky A, Ocherashvili A, et al.

- Neutron detection module based on Li-glass scintillator and array of SiPMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, 67(4): 599-602.
- [60] Ter-Pogossian M M, Phelps M E, Hoffman E J, et al. A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PETT)[J]. Radiology, 1975, 114(1): 89-98.
- [61] Eriksson L, Cho Z H. A simple absorption correction in positron (annihilation gamma coincidence detection) transverse axial tomography[J]. Physics in Medicine and Biology, 1976, 21(3): 429-433.
- [62] Shokeen M, Anderson C J. Molecular imaging of cancer with copper-64 radiopharmaceuticals and positron emission tomography (PET)[J]. Accounts of Chemical Research, 2009, 42(7): 832-841.
- [63] Overweg J A, Volkmar S, Solf T J, et al. Split gradient coil and PET/MRI hybrid system using the same: EP2135107A1[P]. 2009.
- [64] Wagatsuma K, Miwa K, Sakata M, et al. Comparison between new-generation SiPM-based and conventional PMT-based TOF-PET/CT[J]. Physica Medica, 2017, 42:203-210.
- [65] Park K, Jung J, Choi Y, et al. Feasibility study of a time-of-flight brain positron emission tomography employing individual channel readout electronics[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5566.
- [66] Xie Q G, Wagner R G, Drake G, et al. Performance evaluation of multi-pixel photon counters for PET imaging[C]//2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, October 26-November 3, 2007, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2007: 969-974.
- [67] Reddin J S, Scheuermann J S, Bharkhada D, et al. Performance evaluation of the SiPM-based siemens biograph vision PET/CT system[C]//2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Proceedings, November 10-17, 2018, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2018.
- [68] Amirrashedi M, Sarkar S, Ghafarian P, et al. NEMA NU-4 2008 performance evaluation of Xtrim-PET: a prototype SiPM-based preclinical scanner[J]. Medical Physics, 2019, 46(11): 4816-4825.
- [69] Santangelo M F, Sciuto E L, Lombardo S A, et al. Si photomultipliers for bio-sensing applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(3): 335-341.
- [70] Ruffinatti F A, Lomazzi S, Nardo L, et al. Assessment of a silicon-photomultiplier-based platform for the measurement of intracellular calcium dynamics with targeted aequorin[J]. ACS Sensors, 2020, 5(8): 2388-2397.
- [71] Santangelo M F, Libertino S, Turner A P F, et al. Integrating printed microfluidics with silicon photomultipliers for miniaturised and highly sensitive ATP bioluminescence detection[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 99: 464-470.
- [72] Miyamoto H, Minoura I, Okamoto K, et al. SiPM interdisciplinary application in the fields of astroparticle physics and bio-molecular science[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 695: 87-90.
- [73] Zhang D L, Li X Q, Xiong S L, et al. Energy response of GECAM gamma-ray detector based on LaBr₃:Ce and SiPM array[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 921: 8-13.