

硅光电倍增管：发展趋势与应用前景调研

司书屹 2022011090

相关名词和器件简介

- **光电倍增管PMT(Photomultiplier Tube)** 是通过在真空腔室的打拿极之间施加加速电场，使得被加速的光电子在阴极反复倍增，实现信号倍增效果的光子倍增和信号探测装置
- **雪崩光电二极管APD(Avalanche Photo Diode)** 是利用光电效应将光转换为电的电子装置，通过施加高的反向偏压，由于碰撞电离(雪崩效应)，APD显示出内部电流增益效应。一般反向电压越高，增益越高，但反向电压不能超过击穿电压，也因此APD的电流增益有限，对单光子的探测不够灵敏
- **单光子雪崩二极管SPAD(Single-Photon Avalanche Diode)** 是在APD的基础上，专门被设计用来在远高于击穿电压的反向偏置电压下工作的，一类具有反向偏压p-n结的固态光电探测器。SPAD也被理解为工作在盖革模式下的APD，能够探测单光子这类低强度信号
- **硅光电倍增管SiPM(Silicon Photomultiplier)** (或被称为**多像素光子计数器MPPC(Multi-Pixel Photo Counter)**)，该名称由滨松公司最先使用)是通过在较小的面积内并联大量由SPAD阵列组成的微单元，进而实现的支持多光子倍增和高响应速度的信号探测装置，相比PMT具有不受磁场影响、结实耐用和体积小成本低的优点。
- **超导纳米线单光子探测器SNSPD(Superconducting Nanowire Single-photon Detection)** 是一种高性能的单光子探测器，具有很高的探测灵敏度
- **正电子发射断层成像技术PET(Positron Emission Tomography)** 是一种核医学临床检查的成像技术，也被称为正电子断层造影、正电子成像术。通过将半衰期较短的同位素显影剂注射到人体内，利用PMT或APD(及SiPM等)探测同时产生一对光子的并发事件，亦即人体内的放射性同位素发生的正电子湮灭事件，扫描数据实现人体三维成像，常用于肿瘤学诊断
- **流式细胞术(Flow Cytometry)** 是一种生物学技术，用于对悬浮于流体中的单细胞或其它微小颗粒进行计数和分选。涉及激光的散射与信号放大，SiPM有一定应用
- APD/PMT/SiPM对比

探测器类型	雪崩二极管	光电倍增管	硅光电倍增管
工作电压	100-300V	900-4500V	20-30V
增益	10^2 – 10^3	10^6 – 10^8	10^5 – 10^7
暗电流	$\leq 1\text{nA}$	$\leq 1\text{nA}$	$1 - 1000\text{nA}$

探测器类型	雪崩二极管	光电倍增管	硅光电倍增管
温度敏感性	低	高	低
耐辐射特性	差	好	差
磁场敏感性	否	是	否
体积	小	大	小
优点	暗电流小， 温度敏感性低，体积小	增益高， 探测灵敏度高， 暗电流小，耐辐照	偏压低，增益高， 探测灵敏度高， 体积小， 响应速度快， 受温度影响小
缺点	增益及探测灵敏度一般， 工作电压较高， 耐辐照特性差	体积大， 工作电压高， 功耗大， 易受温度和磁场影响	暗电流较大， 耐辐照特性差
灵敏度	-	单光子	单光子
操作电压	-	800V至20000V	30V至50V
大面积	-	是	是，可扩展
高密度阵列	-	否	是
高粒度/分辨率	-	否	是
暗噪声	-	低	中等
均匀性	-	良好	优秀
响应时间	-	快	非常快
光子计数分辨率	-	好	优秀
对环境光的免疫力	-	否	是
紧凑性和轻重量	-	否	是

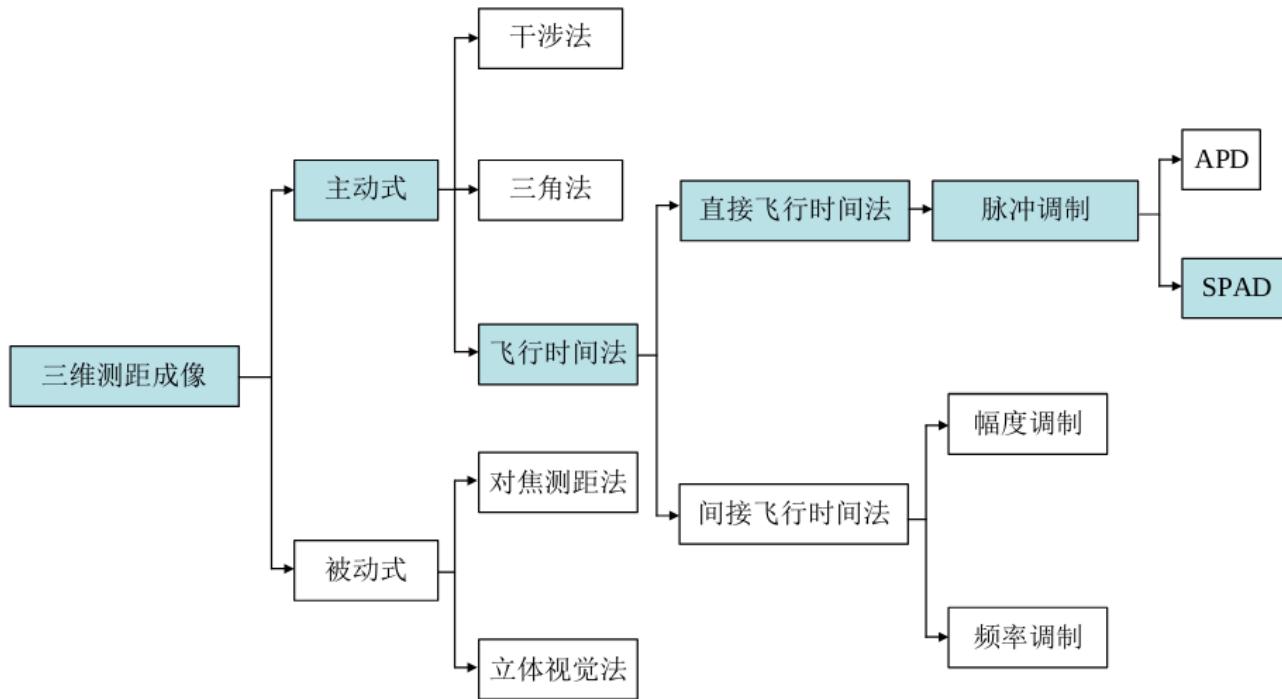
SiPM应用场景

- 雪崩光电二极管APD的发明，提供了通过在半导体器件上施加反向偏压来实现信号放大的新思路。但由于受到击穿电压的限制，APD对单光子的探测不够灵敏，由此发展出了工作在盖革模式下的APD——Gm-APD，是当前光子探测领域最为广泛使用的单光子探测器之一，具有光子计数灵敏度高，体积小，易实现多元集成等特点。
- SiPM最早起源于上世纪60年代，Shockley实验室的R.H.Haitz等人最早提出来Gm-APD的硅基阵列结构，通过在每个像元雪崩结的基底上生长出电阻层作为独立的猝灭电阻并覆盖上金属薄膜作为导线，实现了各像元独立响应和汇聚输出的并联阵列，称为光电倍增管SiPM或多像素光子计数器MPPC
- SiPM不但具有和Gm-APD同等水平的光子计数灵敏度和响应速度，而且在多光子条件下具有较高的动态范围以及线性响应的特性。基于这些优势，SiPM被广泛应用在原子核物理、天体物理、核医学以及激光雷达等领域

激光测距与雷达

- 近年来出现了一种新的激光测距技术——单光子激光测距法。通过光电探测器对单光子时间的响应，结合高精度时间数字转换器，实现远距离、高分辨率的目标测量。SiPM及改进产品在该领域有所应用，目前单光子激光测距技术主要应用在以下四个领域
 - i. 机载单光子激光测距系统：在机载平台下利用激光器发射kHz量级的脉冲激光，实现当飞机在空中高速飞行时，测距仪对地面物体以及地形地貌进行测量绘制。国内外团队对此进行了多年的研究改进，2015年国内的研究成果可以实现在百公里范围量级的精准测距，精度达到2m
 - ii. 星载单光子激光测距系统：NASA最先研制了星载光子技术测距系统，激光发射频率达到2kHz，被广泛应用到地表外貌测绘的研究领域。2018年美国航天局利用相关改进技术实现了对南北极冰川、冰盖高度等的相关测绘
 - iii. 单光子成像：基于单光子测距实现对目标的三维成像。2020年中科大团队利用超导纳米线单光子探测器SNSPD搭建成像系统，实现少数光子即可远距离测距，在功耗较低的同时做到高分辨率成像
 - iv. 地面对空间及卫星测距：该应用场景诞生于探测空间物体，漫反射回地面的光子很少，且背景噪声不可忽略。研究人员利用SNSPD并结合选通门控电路对太空目标进行高精度探测
- 激光雷达技术通过记录激光往返时间来计算目标距离，在电子消费和车载雷达等市场有很大潜力。由于激光雷达系统对较远探测距离和高探测分辨率的要求，近年来越来越多的研究者将视线投向了雪崩光电二极管APD
 - 2003年，Alexis Rochas和Gosch等人研发出了首款基于CMOS工艺的全集成单子雪崩二极管的二维阵列，开辟了CMOS全集成片上数据处理的新道路；
 - 2005年Cristiano Niclass等人提出基于SPAD的阵列化激光雷达芯片，证明了阵列化三维成像方法的适用性。

- 之后随着光学和电子系统技术的发展，基于SPAD阵列的激光雷达系统向着更高空间分辨率、更大的面阵规模和多功能化方向发展。2021年索尼的Oichi Kumagai在ISSCC上提出了一款用于车载的激光雷达接收器芯片，可以实现较高的距离分辨率
- 国内的激光雷达研究起步较晚，当前进展与国外有较大差距
 - 2005年国防科技大学的胡春生等人研制了首款单点式激光雷达系统
 - 2016年南京邮电大学团队研究基于SPAD激光测距的像素单元设计
 - 2017年以来，西安电子科技大学的刘马良等人在SPAD阵列化数字读出电路和APD线性模拟前端读出电路设计方面做出了突破，2021年研发出了国内首款大规模阵列式激光雷达传感器芯片
- 具体而言，基于SPAD阵列的SiPM在激光雷达的三维距离技术的直接时间飞行领域(TOF LiDAR)有所应用



该技术通过记录激光往返时间来实现高精度的定向测距，SPAD对单光子的响应能力使得SiPM在弱信号远距离的雷达使用场景下有所应用

市场调研

概况

(数据来自恒州博智调研报告，时间2022年4月1日，仅供参考)

- 2020年，全球硅光电倍增管市场销售额达到了124.94百万美元，预计2027年将达到193.55百万美元，年复合增长率为6.28%
- 中国市场在过去几年变化较快，2020年市场规模为44.78百万美元，约占全球的35.84%，是全球最大的市场，预计2027年将达到72.92百万美元，届时全球占比将达到37.68%。在未来几年，硅基光电探测器市场有望在亚太地区获得高速增长

- 从产品类型方面来看，硅光电倍增管按类型主要统计了单体式和阵列式两种，其中单体式占据了主要份额，2020年全球单体式硅光电倍增管的市场总量为175.9万件，市场规模为78.51百万美元，约占了全球市场的43.45%
- 从产品市场应用情况来看，3D测距与成像(尤其是医疗影像)的应用领域销售量占比最大，2020年的市场总量为76.9万件，总收入为32.6百万美元，占据总市场规模的26.09%，预计2027年增至26.49%
- 虽然2020年COVID-19对全球贸易造成了一定影响，但其影响并没有导致硅光电倍增管市场增速放缓，这是由于下游行业对硅光电倍增管的需求量较大，且逐年上涨，抵消了疫情造成的不利影响

主要厂商

- 目前全球主要厂商包括ON Semiconductor(SensL，安森美)、Hamamatsu Photonics(滨松光子)和Broadcom(博通)等，2020年主要厂商份额占比超过82.82%，由于该行业门槛较高，预计这些企业未来会占据更多份额
 - 安森美onsemi，专注于汽车和工业终端市场，公司总部位于美国亚利桑那州斯科茨代尔(股票代码ON，自2020年初开始震荡上涨，跑赢标普指数，近五年涨幅277.8%)
 - 滨松光子学株式会社，主要产品线包括光电倍增管、成像器件、光源、光电半导体、成像和分析系统，其公司MPPC(阵列)产品系列如下图

测量波长	学术研究	测量仪器 (流式细胞仪、显微镜等)	PET 扫描仪	LiDAR
VUV/UV	用于学术研究实验			
VIS	用于宽动态范围 S14160 系列	用于精密测量 S13360/S13362 系列	用于 PET 扫描仪 S14160/S14161 系列	
VIS 至 NIR		用于精密测量 (TSV 类型) S13360/S13361/S13363 系列		
NIR		用于可见光 S14420/S14422 系列		用于近红外光 S15639-1325PS

(还没调查是什么原因，滨松股票近五年下跌33.4%，尤其是今年年初到现在跌幅29.39%)

- 博通broadcom，是世界最大的WLAN芯片厂商，也是世界最大的无厂半导体公司之一，总部位于美国加州尔湾，公司目前能提供NUV/NIR范围的SiPM产品(博通股票与安森美类似，从2020年开始震荡上涨，近五年涨幅552.44%，前日6月13号召开的美联储议息会议公布决议后，单日涨超200美金，直到目前涨幅近20%)

参考文献

- [1] 刘欣缘,肖毅,马跃,等.不同鉴别阈值条件下SiPM光子计数激光雷达探测模型及性能分析[J].红外与毫米波学报,2023,42(06):865-875.
- [2] 陈建光. 基于SiPM的激光雷达系统研究[D].浙江大学,2023.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.003266.
- [3] 楚泽坤. 基于SiPM的高灵敏度激光雷达接收机芯片研究[D].西安电子科技大学,2023.DOI:10.27389/d.cnki.gxadu.2022.002677.