

文章编号:1001-5078(2023)01-0003-09

· 综述与评论 ·

单光子探测器研究现状与发展

霍晓培¹, 杨德振¹, 喻松林¹, 李丰君¹, 蔡佳一²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 贵州师范大学, 贵州 贵阳 550001)

摘要:单光子探测器的研制是量子光学和量子信息领域的一个重要研究课题。单光子探测器突破了传统探测器只针对振幅进行采样的局限,同时对光波或者光子的偏振、波矢、位相等特性进行探测,具有可保持测量信号完整性、理论量子效率高、工作电压低、探测灵敏度高等优点,同时具有室温单光子探测的潜力。为了深入了解单光子探测器的研究现状和发展前景,本文介绍了单光子探测器的工作机理,总结对比了光电倍增管、雪崩光电二极管等传统单光子探测器以及基于新型二维材料的雪崩光电二极管、超导纳米线单光子探测器等新型单光子光电探测器的优势与不足,并对其发展前景进行了展望。此外还介绍了单光子探测器在量子通信、激光测距和成像等领域的应用。

关键词:单光子探测;单光子测距;量子通信;雪崩光电二极管;超导单光子探测器

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.001

Research on status and development of single photon detector

HUO Xiao-pei¹, YANG De-zhen¹, YU Song-lin¹, LI Feng-jun¹, CHAI Jia-yi²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The development of single photon detector is an important research topic in the field of quantum optics and quantum information. Single photon detector broke through the limitations of traditional detector that only sample for amplitude, and simultaneously detect the polarization, wave vector and phase of light waves or photons, with advantages of maintaining measurement signal integrity, high theoretical quantum efficiency, low operating voltage, high detection sensitivity and the potential for room temperature single photon detection. In order to further understand the research status and development prospects of single photon detector, the working mechanism of the single photon detector is introduced. Then, the advantages and shortcomings of the traditional single photon detector such as photomultiplier tube and avalanche photodiode, as well as new single-photon detector based on new two-dimensional materials avalanche photodiode and superconducting nanowire single photon detector are summarized and compared, and the prospect of its development is prospected. In addition, the applications of single photon detector in areas such as quantum communication, laser ranging and imaging are introduced.

Keywords: single photon detection; single photon ranging; quantum communication; avalanche photodiode; superconducting single photon detector

1 引言

单光子探测器(single photon detector, SPD)在量

子通信、空间探测和国防建设等领域发挥着重要作用。同时,单光子探测器器件日渐深入的研究及应用

推广,也在一定程度上促进了超导技术、光电探测及光电转换技术领域的发展。

研究表明,单光子探测器可实现对单个光子量级的光能量捕获和转换。光是由大量的光粒子组合形成的,其中单个光子的能量极低,而单光子探测器可以实现对单个光子量级的极低能量的探测。该探测器可通过计数器和甄别器等光子计数器对放大后的光电子信号进行探测。对于能应用于光量子信息器件的单光子探测器,器件的探测波长范围、死区时间、暗计数率、探测效率以及抖动时间等都是非常重要的参数,对探测器的优化也将围绕这些参数来进行。单光子探测器不仅在量子通信中的量子密钥方面起着重要作用,同时在复杂环境下远程探测预警中也展现出广泛的应用前景,逐渐成为近年来国内外研究的热点^[1]。本文介绍了单光子探测器的工作原理,对不同种类单光子探测器现状展开研究分析,并概述了单光子探测器在量子通信、激光测距与成像和关联成像的应用。

2 单光子探测器原理、种类和评价指标介绍

2.1 单光子探测原理

单光子探测器依靠其超高的灵敏度可以对单个光子进行检测和计数,主要功能是将光信号转换为电信号。该器件的探测原理主要基于光电效应进行探测的。光电效应是光量子作用于探测器件后,原子或者分子的电子状态随之发生改变,通过对电子状态变化的测量,从而实现对光子的测量。光电效应可分为内光电效应和外光电效应,内光电效应是由于光量子作用引发电化学性质变化的方式;外光电效应则是探测元件吸收光子并激发逸出电子的方式。

2.2 单光子探测器种类

目前,常用的单光子探测器件主要有光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)、雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)及超导纳米线单光子探测(Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)等。其中,光电倍增管和雪崩光电二极管都属于传统单光子技术的光电器件。光电倍增管由光窗、光电阴极、聚焦电极、倍增极及阳极等部分组成,结构如图 1 所示。其是一种能将微弱的光信号转换成可测电信号的真空光敏器件,原理主要涉及外光电效应及二次发射理论。当光照到光电阴极

时,阴极在光子作用下向真空激发出光电子,逸出的电子在聚焦极外电场作用下经聚焦电极加速进入倍增系统,通过控制倍增级的加载电压,进而使次极释放数百倍等更多电子,最后高电位的阳极把放大后的光电流收集起来,形成阳极电流或电压输出。

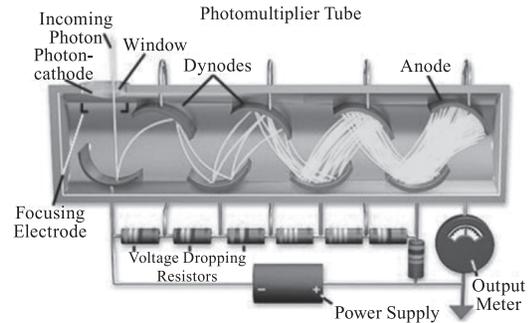
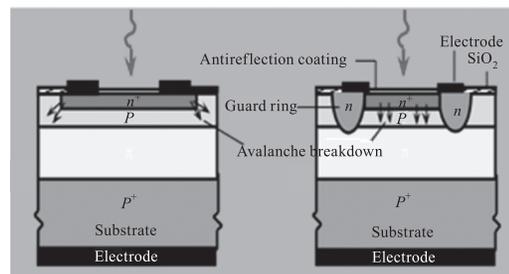


图 1 雪崩二极管的典型结构

Fig. 1 Typical Structure of a PMT

雪崩光电二极管是具有内部光电增益的半导体光电子器件,利用载流子的雪崩倍增效应来放大光电信号,如图 2 所示。其常常采用易产生雪崩倍增效应的硅或锗材质制成的 P-N 结型光电二极管结构,PN 结工作时加上合适的高反向偏压,射入的光被 PN 结吸收后会形成光电流。反向偏压加大时,会产生“雪崩”(即光电流成倍地激增)的现象。其涉及原理是内光电效应,具有低功耗、可靠性高、轻量化等特点,常用于量子通信和激光测距成像等领域。



(a) 没有保护环的硅雪崩光电二极管 (b) 更实际的硅雪崩光电二极管

图 2 雪崩光电二极管的典型结构

Fig. 2 Typical Structure of an APD

近年来,随着光电探测技术以及新型结构的发展,出现了基于量子点的单光子探测器、可见光子计数器、基于频率上转换技术的单光子探测器和超导单光子探测器等多种新颖光电探测器。

2.3 主要评价指标

单光子探测器的评价指标主要有光子探测效率、暗计数率、死时间和时间抖动等。另外,光敏面

尺寸、光子数分辨能力、光谱响应波长等也是需要考
虑的性能参数。

1) 光子探测效率 PDE。PDE 由光耦合效率、光
吸收效率和本征探测效率共同决定,是探测器的核
心评判指标。PDE 越接近 100 %,探测器性能越
优秀。

$$PDE = \frac{\text{探测器光响应计数 } M}{\text{输入到探测系统的总的光子数 } N} \times 100 \% \quad (1)$$

2) 暗计数率 DCR。暗计数率是表征探测器件
噪声水平的指标,用每秒钟暗计数的个数表示。一
个优秀的探测器不仅信号响应能力强,同时应做到
低噪声。

$$DCR = \frac{\text{暗计数个数 } N}{\text{单位时间 } T} \quad (2)$$

3) 死时间 Dead time。探测器产生一个光子响
应后会有一段恢复时间才能进行下一次探测,这段
时间称为死时间,是表征器件响应速度的指标。

4) 时间抖动 Timing jitter。时间抖动是表征光
响应脉冲在时域上的不确定性,直接决定了基于光
子飞行时间的激光测距的空间分辨率。

3 国内外探测器件发展现状

3.1 雪崩单光子探测器

目前,雪崩单光子探测器件发展成熟,国外已经
有许多公司研制出此类单光子探测器产品,比如美
国的 Princeton Lightwave 公司研制的 SPAD 系列以
及日本的 Hamamatsu Photonics 滨松公司的系列产
品。图 3 为滨松公司生产的硅 APD、镓砷 APD、
硅 APD 阵列系列样图及其光谱响应曲线图。硅
APD 在弱光检测中具有高速、高灵敏度特点,主要
工作在波长为 400 ~ 1100 nm 范围之间,且具备增益
机制。镓砷 APD 则工作在 900 ~ 1700 nm 之间,
具备低噪声和更高截止频率等特点。硅 APD 阵列
则具有低噪声和短波范围高灵敏度的特点。

在国内,对于雪崩光电二极管的研究起步较晚,
南京大学宽禁带半导体器件与微纳光电实验室在国
内首先实现了以 W 碳化硅和 III 族碳化物等半导体
材料制作的 SiC-APD 为核心器件的单光子探测器,
其具备低暗计数率、高探测效率和可达纳秒量级
的响应速度的优异特点,此外可实现波长为 210 ~ 370
nm 范围之间,击穿电压为 170 V 等工作特性^[2],如
图 4 所示。

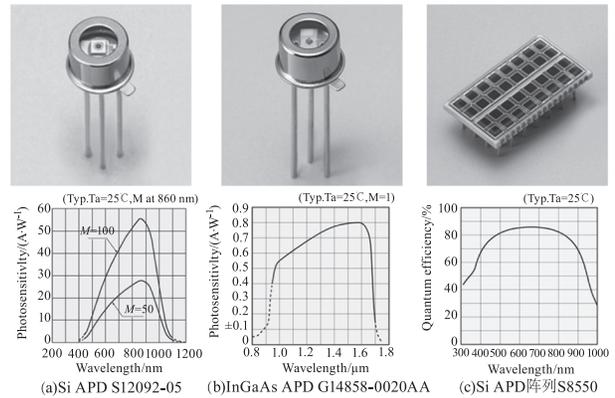


图 3 滨松公司生产的 APD 系列样图及其光谱响应曲线图

Fig. 3 APD series samples and spectral response curves produced by Hamamatsu Company

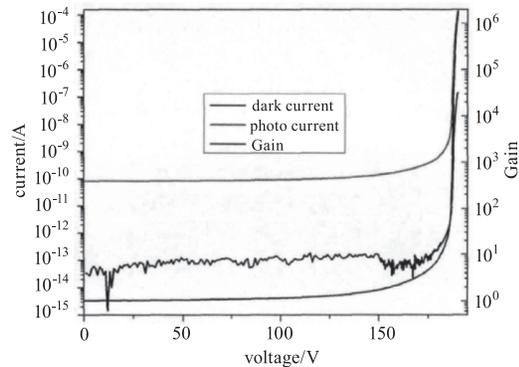


图 4 SiC-APD 器件的雪崩增益特性

Fig. 4 Avalanche growth characteristics of SiC-APD devices

SiC-APD 器件可获得很低的暗电流,雪崩发生
前保持在 1×10^{-13} A 量级,在 190 V 偏压下,雪崩增
益大于 1×10^6 。上海技术物理研究所近几年的
APD 单光子探测器研究上取得了一系列的突破。
成功研制了在 1550 nm 的工作波段上实现探测效率
10 %,门脉冲频率 1 GHz,暗计数率 24 kHz,暗电流
仅为 0.47 nA 的盖格模式单光子探测器;该探测器
在 1064 nm 波段上实现探测率 30 %,暗计数率 8
kHz,死时间 80 ns 下脉冲概率达到 1.4 %。同时该
单位还开展了量子型单光子探测器件的研究,在
77 K 温度下实现了近红外光子数分辨的能力,并在
常规的 APD 器件基础上开展微纳调控新结构的研
究,在 1550 nm 的工作波段上达到了暗电流仅为
 2.5×10^{-2} nA,新的结构同时可以超越常规结构的
速度极限^[3]。2018 年,西南技术物理研究所和电子
科技大学等单位相继开展了 Si-SPAD 和 InGaAs/InP
SPAD 焦平面组件技术研究,成功制作了 64×1
线性模型 Si-APD 阵列, 32×32 和 64×64 Si SPAD
阵列,并应用于无人驾驶汽车等激光测距平台;还开发

了 32×32 和 64×64 InGaAsP/InP SPAD 阵列,并构建了三维成像激光雷达^[4]。2021 年,重庆光电技术研究所设计的一种基于 InGaAsP/InP SPAD 的单光子探测器模块,在 $-30\text{ }^\circ\text{C}$,探测效率为 30.2% 下,暗计数率仅为 1.9 kHz,在死时间为 $0.8\text{ }\mu\text{s}$ 时,后脉冲为 10.4%^[5]。

3.2 超导纳米线单光子探测器

基于 Si 的 APD 和 PMT 器件大多只能实现在可见光波段单光子的有效探测;随后发展起来的基于 InGaAs/InP 的 SPD 可以实现在近红外波段实现探测,但其性能和可见光波段 SPD 相差较远;随后发展的超导 SPD 技术也因计数率低、时间抖动大和极低温度要求等因素限制其广泛应用,故亟需发展综合性能优异的新型探测技术。

2001 年, Goltsman 等人首先利用约 5 nm 厚的超薄 NbN 带制备了一条 200 nm 宽的超导纳米线,成功实现了可见光和近红外的超快单光子探测和计数,为随后超导纳米线单光子探测器 (superconducting SPD, SNSPD) 的研究奠定了基础^[6]。随着对 SNSPD 的制备材料和探测原理的深入研究, SNSPD 在近红外波段的综合性能指标明显优于其他种类的单光子探测器。2009 年, Robert Hadfield 概述了 SNSPD 在探测技术方面取得的重大进展,以及这些发展对量子光学和量子信息领域产生的影响^[7]。2012 年, Natarajan 等人基于 SNSPD 探测原理,概述了 SNSPD 设备性能的改进;在实用制冷技术和光学耦合方案的研究上以及其应用领域做了系统性的介绍^[8]。2021 年, Esmail Zadeh 等人回顾了 SNSPD 的发展历史、工作机制、制造方法、超导材料、读出方案及应用发展,对 SNSPD 的低温装置集成化进行了展望^[9]。随着 SNSPD 的不断发展,其在 1550 nm 工作波长的探测效率目前甚至超过了 90%,远超于其他种类探测器的探测效率。

国内虽然在该领域的研究工作起步较晚,但是超导纳米线单光子探测已经走在世界的前列。2014 年,南京大学超导电子学研究所研制的 SNSPD 在 1550 nm 波段探测效率最高达到 75%,暗计数小于 100 cps^[10]。2017 年,中科院上海微系统所尤立星研究团队在国际上首次采用 NbN 超薄薄膜成功实现了 1550 nm 工作波长、光子探测效率超过 90% 的 SNSPD^[11]。2019 年,该团队通过在介质镜上用双层

纳米线取代单层纳米线研制出的 SNSPD 器件,实现了光子响应概率和吸收效率同时提升。在 0.8 K 条件下,该探测器在 1590 nm 处的最大光子探测效率 (PDE) 为 98%,在 1530 ~ 1630 nm 波长范围内的光子探测效率达到 95% 以上。此外,在 2.1 K 条件下,探测器在 1550 nm 处的最大 PDE 为 95%^[12]。表 1 为 SNSPD 研发代表性机构及性能信息。

表 1 SNSPD 研发机构及性能信息

Tab. 1 SNSPD research and development institutions and performance information

Name	Photon efficiency @ 1550 nm / %	Dark count rate / cps	Repetition rate / MHz	Time jitter / ps	Temperature / K
NIST	93	1	10	150	0.1
MIT	57	100	100	30	1.6
NICT	84	100	50	68	2.1
SIMIT	95	100	20	66	2.1

超导纳米线单光子探测器作为新兴的光子探测器,其死时间极短,暗计数很小,用于单光子测距可以忽略。基于上述优势,其越来越广泛地应用于激光测距和成像以及量子通信等领域。

4 单光子探测器件应用发展

4.1 量子通信应用

量子通信利用量子纠缠效应进行信息传递,是基于量子态进行传输的。现有的量子通信实验一般以光子为量子态载体,由电磁波携带信息,其表现形式即为光子态传输。单光子探测器从传统的光电倍增管到半导体材料的硅管、铟镓砷管再到超导单光子探测器,现已发展到可以适用于不同场合工作。

量子密钥分配 (Quantum Key Distribution, QKD) 于 1984 年提出,允许两个用户通过一个潜在的不安全的量子通道交换可证明安全的密钥^[13]。2015 年, Boris Korzh 提出的基于 InGaAs SPD (PDE 为 20 ~ 22%, DCR 为 1 cps) 的相干单向协议的 QKD 系统,能够在 307 公里的超低损耗光纤 (51.9 dB 损耗) 上分发可证明安全的密码密钥^[14]。SNSPD 具有探测效率高、暗特性计数率低、时间抖动小等特点,越来越广泛应用于 QKD 实验。2005 年, Hadfield 等人首次利用 SNSPD 进行 QKD 实验。验证了超过 42.5 km 的安全密钥速率交换。但受限于当时 SNSPD 系统的工作性能, QKD 系统误码率较高^[15]。2007 年, Takesue 等人报道了使用 SNSPD 在 200 km

光纤上实现 12.1 bps 安全密钥率的 QKD 记录,超过了使用 SPAD 实现的距离记录^[16]。此后,越来越多的 QKD 实验使用 SNSPD 进行,有效地提高了 QKD 距离和密钥率。2021 年,PITTALUGA M 提出的一种基于 SNSPD 的波分复用 TF-QKD 双场量子密钥分配实现了超过 600 km 的通信距离以及提高了两个数量级的安全密钥速率^[17]。

国内单光子探测器在量子通信领域实现了突破性进步,2020 年,中科院与清华大学合作,基于高计数率低噪声单光子探测器,突破远距离独立激光相位干涉技术,分别实现了 500 公里量级真实环境光纤的双场量子密钥分发(TF-QKD)、相位匹配量子密钥分发(PM-QKD)^[18]。2022 年,中国科学技术大学郭光灿团队,基于 0.1274 Hz 暗记数且时间抖动小于 50 ps 的超导探测器,改进四相位调制双场协议,并进一步提升了独立光源的锁相稳频特性,将光纤双场量子密钥分发的安全传输距离延长至 833 km^[19]。

单光子探测器的探测效率、暗计数水平、后脉冲水平以及可达到的工作频率等性能提升直接影响着量子通信系统。未来提高光子探测效率和降低暗计数率等探测器性能的改进和新的协议等理论发展,可有效提高 QKD 距离和密钥率,促进 QKD 的发展。

4.2 单光子激光测距

激光测距主要包括飞行时间法(TOF)、干涉法和三角法。近年来随着单光子探测器的发展,激光测距又衍生出一种新的测距方式,即单光子激光测距法。单光子激光测距系统中光子探测器可以对光子进行响应,从而实现更远距离的测量。

2000 年,Pellegrini 等使用调 Q 激光器(25 MHz 重复频率、850 nm 发射波长、10 ps 脉宽和 10 pJ 脉冲能量)和 Si-APD 探测反射回波检测非合作目标表面的散射信号,实现 50 m 的探测距离,对 10 个返回的光子获得了约 3 mm 的深度分辨率^[20]。2007 年,英国赫瑞瓦特大学 Warburton 等人首次在 1550 nm 波长下使用 SNSPD(抖动约 70ps)在 330 m 距离实现了 1 cm 的地对地分辨率和 4 mm 的深度分辨率^[21]。2009 年,McCarthy 等添加一个扫描飞行时间系统,利用 Si-SPAD(有源面积直径 180 μm ,约 400 ps 抖动)时间相关单光子计数技术,在白天条件下实现了对 325 m 外低特征目标的厘米级深度

分辨率的探测^[22]。2016 年,Degnan 等研制出了采用 60 kHz 频率和亚纳秒脉宽的频脉冲激光器,然后利用 Gm-APD 阵列来接收目标反射回波的机载平台下的单光子激光测距系统,实现了亚分米水平的测量精度^[23]。

国内在激光测距领域也实现了精度和距离的进步。2017 年,南京大学使用 SNSPD 激光雷达系统(1064 nm 波长,DCR 小于 100 cps)在海雾分布特征下实现了 180 km 直径的远距离测距区^[24]。2020 年,中国科学院云南天文台张海涛等将阵列超导纳米线单光子探测器和多通道事件计时器等阵列探测技术应用于激光测距试验系统中,成功对轨道高度为 1000 km、雷达截面积为 0.045 m^2 的小目标进行了精准探测^[25]。2021 年,华东师范大学在单光子测距系统中引入参考位置,有效抑制了系统延时漂移,光子飞行时间测量精度达到 0.5 ps,在 2 m 测距距离处,单测距精度达到 65 μm ^[26]。表 2 为不同探测器在单光子激光测距应用的性能信息。

表 2 不同探测器在单光子激光测距应用性能信息

Tab.2 Performance information of different detectors in single photon laser ranging applications

Detector type	Working parameter (wavelength, jitter)	Performance (detection range, depth resolution)	Reference
Si-APD	850 nm, 10 ps	50m, 3mm	[20]
SNSPD	1550 nm, 70 ps	330m, 4mm	[21]
Si-SPAD	400 ps	325 m, cm	[22]
SNSPD	1064 nm, < 100 cps (DCR)	180 km	[24]
SNSPD	1064 nm, ≤ 400 ps	0.045 m^2 @ 1000 km	[25]
Si-APD	532 nm, 56 ps	65 μm @ 2 m	[26]
SNSPD	1550 nm, 26.8 ps	115 m, 4mm	[27]

目前,应用于单光子测距系统的探测器有雪崩光电二极管和超导纳米线单光子探测器等,根据具体工作场合环境使用合适性能的探测器,实现远距离测距。死时间极短和低暗计数等性能优化是未来改进单光子探测器的主要方向。

4.3 单光子成像

随着自时间相关的光子计数激光测距技术的逐渐发展,光子计数激光测距系统时间分辨率也在逐渐提高。在单光子探测器成像方面,国内发展较快,同美国等国家已走在世界前列。近年来单光子成像研究工作如下。2011 年,中国科学院上海技术物理

研究所在单点激光测距的基础上,基于被动调 Q 激光器(13 kHz 重复频率、532 nm 发射波长、600 ps 脉宽和 1 μJ 单脉冲能量)研制出了光子计数三维成像激光雷达系统^[28];2013 年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所利用 26.8 ps 极低抖动的 SNSPD 器件开展了 1550 nm 波段的测距实验,成功实现了 115 m 的激光测距成像和 4 mm 的深度分辨率^[27];同年,英国赫瑞瓦特大学 Buller 团队率先将 1560 nm 波段 SNSPD 器件引入飞行时间深度成像系统中,在日光下实现了 1 km 外的物体成像,并获得厘米量级的分辨率^[29];2020 年,美国喷气推进(JPL)实验室与麻省理工学院(MIT)合作使用了特殊的化铌 SNSPD,在 1550 nm 波长下实现了抖动约 3 ps 的时间分辨率,且成像精度达到了亚毫米级别^[30];2020 年,中国科学技术大学利用超导纳米线单光子探测器实现了对 45 km 远距离的 3D 成像实验^[31]。

2021 年,中国科学技术大学徐飞虎等利用 In-GaAs/InP SPAD 探测器(20% PDE, 210ps 抖动, 2.8 kHz 暗计数率, 32 ps 时间分辨率)实现了在 1.43 km 范围内的非视域成像和隐藏物体的实时跟踪^[32];同年,该研究团队利用脉冲泵浦频率上转换探测技术以及长波泵浦和时间域滤波方式,实现了 1.4 ps 时间分辨率和 5 Hz 暗计数率的近红外单光子探测器,最终该实验成功对视域外毫米级大小的字母实现了高精度非视域成像,为技术的实用化发展奠定了研究基础^[33]。此外,徐飞虎团队提出了一个紧凑的同轴单光子激光雷达系统,采用新的噪声抑制技术能够实现三维成像高达 201.5 km,每像素只有 0.44 个信号光子。在超长范围内实现实用、低功率激光雷达的重要一步。图 5 为该文章 201.5 km 以上的远程主动成像说明^[34]。

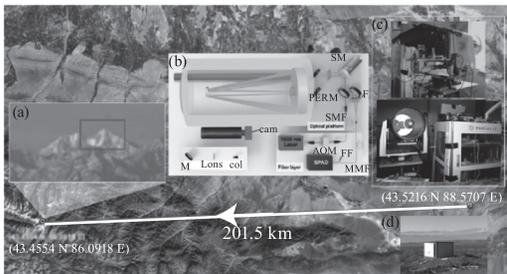


图 5 远程主动单光子成像机理与效果图^[34]

Fig. 5 Mechanism and effect of remote active single photon imaging

单光激光测距技术作为新兴的激光测距方法,

已经广泛应用于远距离激光测距和单光子激光成像等领域,并且取得重大研究进展。

4.4 量子关联成像

上节介绍的是基于光子飞行时间的测距成像,是一种非关联成像。此外还有基于光子在时空域上相关性的关联成像。量子关联成像又称为鬼成像或双光子成像,鬼成像是光电流的关联测量获取物体图像信息的新型成像方式。如图 6 所示,鬼成像是基于双光路的成像,其中一束光(信号光)作用于待成像物体,照射在一不具有空间分辨能力的桶探测器;另一束光(参考光)不作用于物体,直接照射在一个具有空间分辨能力的探测器上,将两束光路信号符合运算得到光强总值,即可恢复物体的像。最早的关联成像方案使用纠缠双光子作为光源并且具有非定域成像、突破瑞利衍射极限等奇特性质,因此受到了人们的广泛关注^[35-36]。

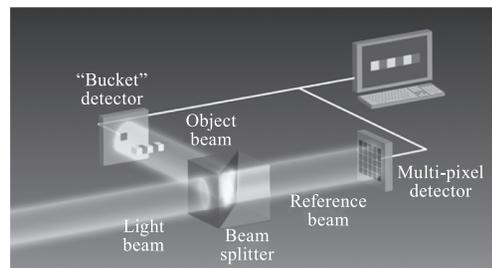


图 6 鬼成像示意图^[37]

Fig. 6 Schematic of ghost imaging

鬼成像的研究过程大致如下:1995 年,马里兰大学的史砚华小组利用自发参量下转换产生的纠缠行为光子对完成了首例鬼成像实验^[38]。2002 年,Bennink 等利用经典光源的随机涨落而不是纠缠光源同样完成了鬼成像实验^[39]。随后,大多数鬼成像是基于赝热光源完成的。2005 年,相较于以往实验使用随机散射激光,中国科学院的吴令安团队在世界上首次实现了易获得和测量且光源相干时间较短的真热光源无透镜量子成像^[40]。随后,为提高鬼成像速度和质量,学者们进行了诸多研究。2009 年,KATZ O 等基于压缩感知技术,提高了成像质量^[41]。韩申生等提出通过引入稀疏约束,利用压缩感知理论可实现超分辨鬼成像^[42]。2010 年,意大利 Lugiato 团队提出差分鬼成像(differential ghost imaging, DGI)技术,其可以以绝对单位测量物体的透射函数,提高基于空间相关波束成像信噪比,使量子成像的成像质量得到显著提

升^[43]。2015年,上海光机所提出了一种结构化图像重构技术,通过引入正交性约束方法显著提高了三维鬼成像激光雷达的成像质量^[44]。2016年,清华大学戴琼海团队利用空间光调制器的冗余空间分辨率来实现调制频率的倍增,完成了42 Hz、80 × 80分辨率的动态目标成像^[45]。2018年,孙鸣捷等提出了一种基于LED的高速照明模块的计算鬼成像方案。在32 × 32像素分辨率下,实现了1000 f/s帧率的连续成像,比之前的鬼成像系统高出约2个数量级^[46]。2021年,Teruaki Torii等提出了一种新的时分鬼成像方法,将相关函数计算过程中的图案总数划分为具有较少光照图案的子单元,然后计算每个子单元的相关性,并对每个子单元获得的中间图像进行合成。该方法实现了在低信噪比情况下可重建出高质量图像^[47]。

鬼成像作为一种新型的成像技术,未来与激光雷达、光学加密、边缘检测、3D成像、高光谱、窄带滤光和超衍射极限分辨等应用光学和成像技术领域的高精尖技术手段的结合可以衍生出了众多有广阔应用前景的研究方向。

5 总结

本文主要介绍了国内外对单光子探测器件的研究和应用。现阶段,单光子探测器主要从光学结构、性能参数优化、光学与器件的集成与小型化等器件设计和在远距离探测成像和量子关联成像等应用领域展开研究并取得了长足发展。对于传统单光子器件比如雪崩二极管等,仍需要对其光谱响应范围和暗计数率等技术难点进行深入研究。对于新兴的SNSPD器件,其优势明显,该探测器探测效率高、死时间极短、暗计数很小,具备优秀的光电性能。但SNSPD严格的温度要求限制了其应用,综上所述,低温装置集成化、小型化、常温低噪声等性能是单光子探测器未来发展的重点和难点。随着材料制备技术进步和器件结构优化发展,单光子光电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] 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): 202 - 134.
- [2] Zhou D, Liu F, Lu H, et al. High-Temperature Single Pho-

- ton Detection Performance of 4H-SiC Avalanche Photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(11): 1136 - 1138.
- [3] Hu Weida, Li Qing, Chen Xiaoshuang, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2019, 68(12): 7 - 41. (in Chinese)
胡伟达, 李庆, 陈效双, 等. 具有变革性特征的红外光电探测器 [J]. *物理学报*, 2019, 68(12): 7 - 41.
- [4] Song Haizhi. Avalanche photodiode focal plane arrays and their application to laser detection and ranging [M]. *Intech Open*, 2018.
- [5] Cui Dajian, Zhang Cheng, Zhao Jianglin, et al. Multi-mode fiber coupled ingaaspmodule single-photon avalanche diode [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(3): 327 - 331. (in Chinese)
崔大健, 张承, 赵江林, 等. 多模光纤耦合 InGaAsP/InP 单光子探测器模块 [J]. *半导体光电*, 2021, 42(3): 327 - 331.
- [6] GOL'Tsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(6): 705 - 707.
- [7] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 696 - 705.
- [8] Natarajan, Chandra M, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(6): 63001.
- [9] Esmaeil Zadeh I, Chang J, Los J W N, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors: a perspective on evolution, state-of-the-art, future developments, and applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(19): 190502.
- [10] Zhang Labao, Kang Lin, Chen Jian, et al. Development of superconductor nanowire single photon detector [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2014, 50(3): 254 - 261. (in Chinese)
张蜡宝, 康琳, 陈健, 等. 超导纳米线单光子探测器研究新进展 [J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2014, 50(3): 254 - 261.
- [11] Zhang W J, You L X, Li H, et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90 % at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(12): 31 - 40.

- [12] Hu P, Li H, You L, et al. Detecting single infrared photons toward optimal system detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36884 – 36891.
- [13] C H Bennett, G Brassard. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[J]//*Int. Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 1984: 175 – 179.
- [14] Korzh, B., Lim, C., Houlmann, R. et al. Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre[J]. *Nature Photon*, 2015, 9: 163 – 168.
- [15] R H Hadfield, J L Habib, J Schlafer, et al. Quantum key distribution at 1550 nm with twin superconducting single-photon detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(24): 241129.
- [16] Takesue H, Nam S W, Zhang Q, et al. Quantum key distribution over a 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 343 – 348.
- [17] Pittaluga M, Minder M, Lucamarini M, et al. 600 km repeater-like quantum communications with dual-band stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(7): 530 – 535.
- [18] Jiu-Peng C, Chi Z, Yang L, et al. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(7): 070501.
- [19] Wang, S., Yin, ZQ., He, DY. et al. Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre[J]. *Nat. Photon*, 2022, 16: 154 – 161.
- [20] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. *Measurement Science, Technology*, 2000, 11, 712 – 716.
- [21] Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, et al. Sub-centimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2266.
- [22] Aongus McCarthy, Robert, et al. Long-range time-of-flight scanning sensor based on high-speed time-correlated single-photon counting[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6241 – 6251.
- [23] Degnan J J. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 958.
- [24] Zhu J, Chen Y, Zhang L, et al. Demonstration of measuring sea fog with an SNSPD-based lidar system [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 15113.
- [25] Zhang Haitao, Li Zhulian, Tang Rufeng, et al. Application of array detection technology in laser ranging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 140 – 147. (in Chinese)
张海涛, 李祝莲, 汤儒峰, 等. 阵列探测技术在激光测距中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 140 – 147.
- [26] Wu Chenyi, Wang Linli, Shi Haotian, et al. Single-photon ranging with hundred-micron accuracy [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2021, 70(17): 125 – 130. (in Chinese)
吴琛怡, 汪琳莉, 施皓天, 等. 百微米精度的单光子测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 125 – 130.
- [27] Chen S J, Liu D K, Zhang W X, et al. Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3241 – 3245.
- [28] Guo Ying, Hou Libing, Shu Rong, et al. Photon counting 3D imaging laser radar analysis and experiments[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(10): 1081 – 1084. (in Chinese)
郭颖, 侯利冰, 舒嵘, 等. 光子计数三维成像激光雷达的分析与实验[J]. *激光与红外*, 2011, 41(10): 1081 – 1084.
- [29] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell N R, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560nm wavelength single-photon detection[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904 – 8915.
- [30] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, et al. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(4): 250 – 255.
- [31] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(19): 1532 – 1540.
- [32] Wu, C., Liu, J., Huang, X., et al. Non-line-of-sight imaging over 1.43 km[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(110): 1073.
- [33] Wang B, Zheng M Y, Han J J, et al. Non-line-of-sight imaging with picosecond temporal resolution[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(5): 53602. 1 – 53602. 6.
- [34] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, (8): 344 – 349.
- [35] Kyshkodn. *Photon and nonlinear optics* [M]. New York: Gordon and Breach Science, 1988.
- [36] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J].

- Physical Review A, 1995, 52(5):R3429.
- [37] Saldin D. Ghost imaging with X rays[J]. Physics, 2016, 9:103.
- [38] Strekalov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, et al. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(18):3600–3603.
- [39] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. “Two-Photon” coincidence imaging with a classical source[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11):113601.
- [40] Zhang D, Zhai Y H, Wu L G, et al. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. Optics Letters, 2005, 30(18):23254–2356.
- [41] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(13):131110.
- [42] Gong, W L, Han S S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. Physics Letters A. 2012, 376:1519–1522.
- [43] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25):253603.
- [44] Yu H, Li E, Gong W, Han S. Structured image reconstruction for three-dimensional ghost imaging lidar[J]. Opt Express, 2015, 23(11):14541–14551.
- [45] Yuwang Wang, Yang Liu, Jinli Suo, et al. High speed computational ghost imaging via spatial sweeping[J]. Scientific Reports, 2017, (7):45325.
- [46] Xu ZH, Chen W, Penuelas J, Padgett M, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. Opt Express. 2018, 26(3):2427–2434.
- [47] Torii T, Haruse Y, Sugimoto S, et al. Time division ghost imaging[J]. Opt Express. 2021, 29(8):12081–12092.