

超导纳米线延迟线单光子成像器件进展及应用

孔令东^{1,2†}, 赵清源^{1,2*†}, 涂学凑^{1,2}, 张蜡宝^{1,2}, 贾小氢^{1,2}, 康琳^{1,2}, 陈健^{1,2}, 吴培亨^{1,2}

¹南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

²南京大学超导电子学研究所, 江苏 南京 210023

摘要 单光子成像技术通过对每个光子携带的时空信息进行探测, 实现对物体图像的重构。基于超导纳米线的单光子探测器具有高效率、低时间抖动、宽响应波段的优势, 非常适合单光子成像场景的需求。超导纳米线延迟线单光子成像器件是一种新型的单光子成像器件, 它利用超导纳米线特有的高动态电感构造低速微波传输线, 通过对输出电脉冲进行时间逻辑分析, 同步读取光子的到达时刻和空间位置。本文将介绍这种成像器件的设计原理、几何结构和读出方式。同时, 介绍基于此成像器件在强背景噪声下的单光子成像实验, 证明了通过高性能器件和重构算法的联合优化所实现的成像系统性能增强。

关键词 成像系统; 单光子成像; 超导器件; 单光子探测器; 超导纳米线; 光子计数成像; 计算成像

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011002

Progress and Applications of Superconducting Nanowire Delay-Line Single-Photon Imagers

Kong Lingdong^{1,2†}, Zhao Qingyuan^{1,2*†}, Tu Xuecou^{1,2}, Zhang Labao^{1,2},
Jia Xiaoqing^{1,2}, Kang Lin^{1,2}, Chen Jian^{1,2}, Wu Peiheng^{1,2}

¹School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract Single-photon imaging is a technology that detects the spatial and temporal information carried by each photon to reconstruct an object image. Single-photon detectors based on superconducting nanowires have the advantages of high efficiency, low time jitter, and wide response spectrum, which is suitable for single-photon imaging applications. The superconducting nanowire delay-line single-photon imager is a novel single-photon imager. It utilizes the high kinetic inductance of the superconducting nanowires to build an ultraslow microwave transmission line. The arrival time and spatial position of photons can be simultaneously measured by reading the arrival times of the output pulses. This study introduces the design principle, geometry structure, and readout method of this imager. Besides, we introduce a single-photon imaging experiment in presence of strong background noise to demonstrate the performance enhancement using the joint optimization of high-performance imaging devices and reconstruction algorithms.

Key words imaging systems; single-photon imaging; superconducting devices; single-photon detector; superconducting nanowire; photon-counting imaging; computational imaging

OCIS codes 040.1240; 040.3780; 040.5570

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-03-12; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(62071214, 61801206)、江苏省双创人才项目(20191479)、江苏省双创团队项目(20192032)

* E-mail: qyzhao@nju.edu.cn

† 共同第一作者

1 引言

极弱光成像技术推动了远距离激光雷达^[1-2]、生物成像^[3]和天文探测^[4]等领域的快速发展。在这些场景中,目标物体反射的光通常是单光子水平,远低于常规线性光探测器的灵敏度极限,因此需要使用具备单光子灵敏度的单光子成像器件。量子信息技术的发展加深了我们对光的理解和操控,也启发成像领域的科研人员开展基于单光子探测的新型成像技术(quantum inspired computational imaging)^[5]的研究工作。光子作为光量子性的体现,是光能被检测到的最小能量单元。传统相机通过对不同位置光强的探测,实现物体成像。在单光子成像体系中,图像信息通过采集光子是否到达、到达位置、到达时间等信息,并结合图像重构算法来恢复物体信息。在利用光子的三维信息(x, y, t)和量子统计特性,并引入计算摄像学的最新技术后,陆续涌现出多种新型的单光子成像方法,实现了传统技术无法实现的成像功能,开辟了新的科学研究方向。例如,当入射光已经微弱至传统相机无法工作的强度时,单光子成像技术能够突破经典成像的信噪比极限:即使每个像素仅能探测一个光子,也能够复原出物体的三维图像^[6-7],从而提升现有遥感和侦察系统的工作距离和成像质量。又例如,对于隐藏在角落的物体,可以通过计算光子在墙面的散射和飞行过程,复原出视线外物体的三维图像,从而对隐藏的物体进行识别和跟踪,这是有望应用于安防、反恐等特殊场合的最新技术^[8]。恢复透过散射介质的图像信息一直是成像领域的大难题。单光子计算成像利用每个光子的时间和空间信息配合反演算法,可以对散射材料80倍平均自由程厚度的材料进行穿透成像。该技术在生物活体组织成像中具有良好的

应用前景^[9]。

单光子成像的质量主要依赖于对目标反射光子的高精度探测。早期的单光子成像技术利用单像素的单光子探测器和栅格扫描来收集三维数据^[6,10],例如,基于半导体技术的单光子雪崩二极管(SPAD)。增强型电荷耦合器件(ICCD)、电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)都是基于CCD改进的单光子成像器件。虽然他们具备单光子的灵敏度,但存在时间分辨率低、探测效率低等问题。集成时间读取电路的单光子探测器阵列(SPAD array)将盖革模式的单光子雪崩二极管(Geiger mode avalanche photodiode)组合成阵列结构,并对每一个像元集成为时间-数字转换电路(TDC),能够实现几百皮秒(ps)的时间分辨率;但TDC电路占用了片上空间,牺牲了探测单元的面积,因此目前SPAD成像器件的空间分辨率较低,像素间距通常大于 $50\ \mu\text{m}$ ^[11]。基于半导体技术的单光子成像器件需要同时实现高空间分辨率和高时间分辨率,如采用更加集成的微加工工艺、优化读出电路的方式、采用微透镜增加占空比等。

超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是一种性能优异的基于超导材料的单光子探测器。处于超导状态的纳米线在吸收光子后跳变至电阻态,从而影响电路的电流分布。通过低噪声放大器读出电流变化所产生的光脉冲响应(图1),从而实现一次光子探测。与现有的半导体单光子探测器相比,SNSPD具备 $>90\%$ 的器件探测效率、 $<1\ \text{Hz}$ 的暗计数率、 $<10\ \text{ps}$ 的时间抖动、 $<10\ \text{ns}$ 的恢复时间以及从可见光至近红外的宽谱响应范围,是目前单光子探测领域综合性能最优的探测器^[12],已经被成功应用于量子保密通信、深空通信、激光测距、空间碎片探测等,并表现出比半导体探测器更优的性能。

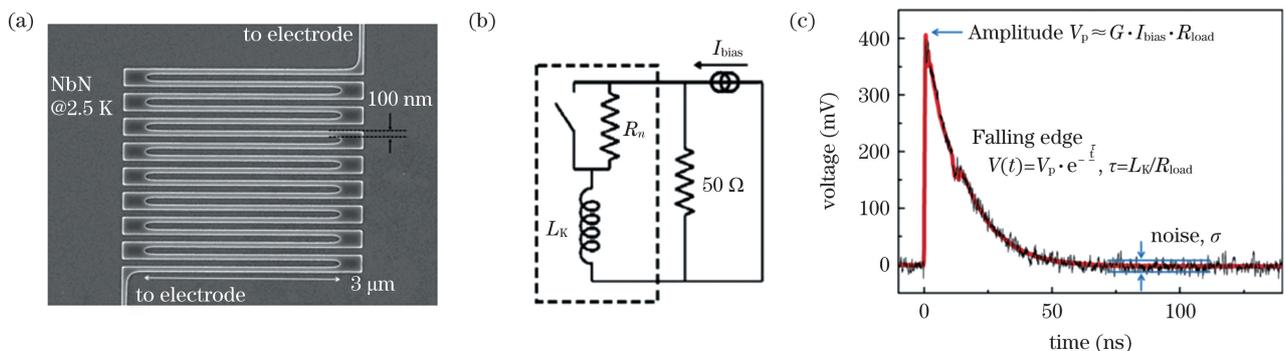


图1 超导纳米线单光子探测器。(a)典型的蜿蜒线结构;(b)SNSPD等效电路图;(c)输出脉冲波形

Fig. 1 Superconducting nanowire single-photon detector (SNSPD). (a) Typical meandered nanowire; (b) equivalent circuit of SNSPD; (c) waveform of output pulse

SNSPD 在红外区有很高的探测效率、较小的暗计数和较低的时间抖动,这些性能尤其适合光子稀缺场景下的成像。2013年,英国赫瑞瓦特大学和格拉斯哥大学的团队合作,利用低抖动、低暗计数的 SNSPD 实现了远距离的高精度深度成像^[13]。2015年,中科院上海微系统与信息技术研究所利用一个低抖动的 SNSPD 实现了白天室内/外的少光子三维成像^[14]。2018年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的课题组基于 SNSPD 设计了一种短波红外的单光子单像素相机,实现了低信号背景比的视频速率成像^[15]。在生物成像领域,2020年,中科院深圳先进技术研究院和南京大学超导电子学研究所合作,利用 SNSPD 实现了近红外二区的生物荧光寿命成像^[3]。

以上 SNSPD 的成像应用都是基于单像元探测器,而使用阵列面阵可以避免对图像的空间扫描,加快成像速度,实现对动态非合作目标的跟踪等应用。针对小规模 SNSPD 阵列,将每个像元单独引出读出是最直接的方法,目前已经实现了 64 像元阵列的直接读出^[16]。但是,随着像元数的增加,同轴线引入的热负载越来越大,制冷机有限的制冷功率使得这种直接读出的方式无法适应更大规模的阵列。近年来,一些针对 SNSPD 阵列的复用结构和低温读出电路方案陆续被提出:2018年,日本国家信息与通信研究院(NICT)基于单磁通量子线路,设计了一个事件驱动的编码器,实现了对 64 像元阵列的单通道编码读出^[17];2019年,美国喷气推进实验室(JPL)利用 32×32 的行列复用结构首次读出 1024 像元的阵列^[18];2020年,南京大学超导电子学研究所基于超导纳米线逻辑器件,设计了一个 4 bit 的二进制编码器,可用于读出 15 个像素的空间位置^[19]。

2 超导纳米线延迟线成像器件

2.1 本征的时空双态光子信息读出

上述工作利用读出电路对 SNSPD 探测器阵列进行复用读出,随着阵列规模的提升,读出电路的规模和复杂度也增加。同时,超导探测器所工作的极低温环境又对读出电路的功耗提出了严苛的要求。2017年,美国麻省理工学院的 Karl Berggren 教授、赵清源博士后及其合作者提出一种无需片上读出电路的超导纳米线单光子成像器件(SNSPI)^[20]。如图 2 所示,SNSPI 同样采用超导纳

米线作为光探测单元,但不同于传统单个 SNSPD 的设计,SNSPI 中的纳米线被设计为微波传输线的结构。当光子在纳米线位置 x 处被吸收,会破坏此处纳米线的超导状态,将其激发至电阻态。纳米线超导至电阻态的转变,同时也激发出一对传输方向和极性相反的电脉冲。由于此结构中的纳米线被设计为传输线的模式,被激发的脉冲对将沿着纳米线往两端传输。脉冲到达纳米线两端的时间分别为:右脉冲 $t_R = t_p + (L/2 - x)/v$,左脉冲 $t_L = t_p + (L/2 + x)/v$,其中 t_p 为光子到达纳米线的时刻, L 为纳米线的总几何长度, v 为电脉冲在纳米线中的传输速度。通过简单的运算,可以从测量的脉冲到达时间差获得光子到达的位置 $x = (t_L - t_R)v/2$;相应地,通过脉冲到达时刻之和,获得光子的到达时刻 $t_p = (t_L + t_R - L/v)/2$ 。

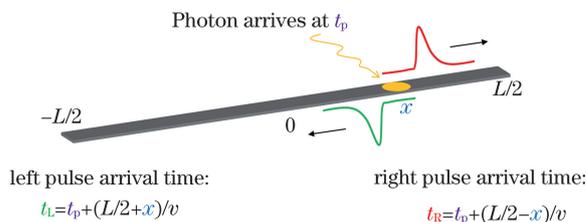


图 2 超导纳米线延迟线实现光子时空双态读出示意图
Fig. 2 Schematic of reading the spatial and temporal information of a photon in a superconducting nanowire delay line

这种基于时间延迟的读出方式可以应用于超导纳米线单光子探测器的另一个重要原因在于:超导纳米线具有极高的动态电感[~ 1000 倍于纳米线(100 nm 宽)的几何电感,图 3]。因此,当纳米线宽 100 nm 时,微波的传输速度 v 仅约为光速的 2%。如此慢速的传输线,既保证了可以通过 ps 量级的时间测量精度获得 $< 10 \mu\text{m}$ 的空间分辨率,又可以通过更短的纳米线实现更多位置的分辨,构建高空间分辨率、大规模的成像器件。

在上述读出方式中,超导纳米线既是成像单元,同时又起到了延迟线读出的功能。通过测量脉冲的到达时刻并进行简单的信号处理,就能够同时获得光子的到达时刻和到达位置,实现单光子的时空三维信息测量。相比于使用片上探测器阵列加读出电路的方式,SNSPI 并不需要集成复杂的电路,极大地简化了读出方式,同时也保证了纳米线的探测性能不受读出电路的干扰。

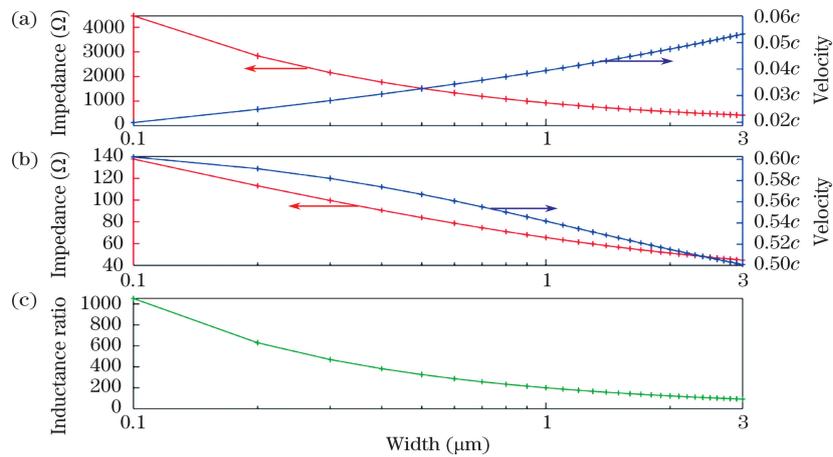


图3 超导纳米线微波特性。(a)超导共面波导(超导薄膜选用氮化铌材料,动态电感为80 pH/square,衬底为热氧化硅,信号线与地线的间隔为500 nm)的特征阻抗和微波传输速度;(b)正常金属共面波导(无动态电感)的特征阻抗和微波传输速度;(c)动态电感与几何电感的比值

Fig. 3 Microwave characteristics of a superconducting nanowire. (a) Characteristic impedance and velocity of superconducting coplanar waveguides (The superconducting film is NbN with a kinetic inductance of 80 pH/square. The substrate is thermal dioxide silicon. The gap between signal line and ground is fixed at 500 nm.); (b) characteristic impedance and velocity of coplanar waveguides made from normal metal (no kinetic inductance); (c) ratio of kinetic inductance to geometric inductance

2.2 SNSPI 几何结构设计

超导纳米线成像器件由一根连续的纳米线蜿蜒实现。通过控制纳米线的空间蜿蜒结构,可以获得

不同形式的面阵和线阵。一种成像器件的设计方式是用一根连续的纳米线同时作为探测器和延迟线^[20],如图4(a)所示。这种设计方式可以使得器件

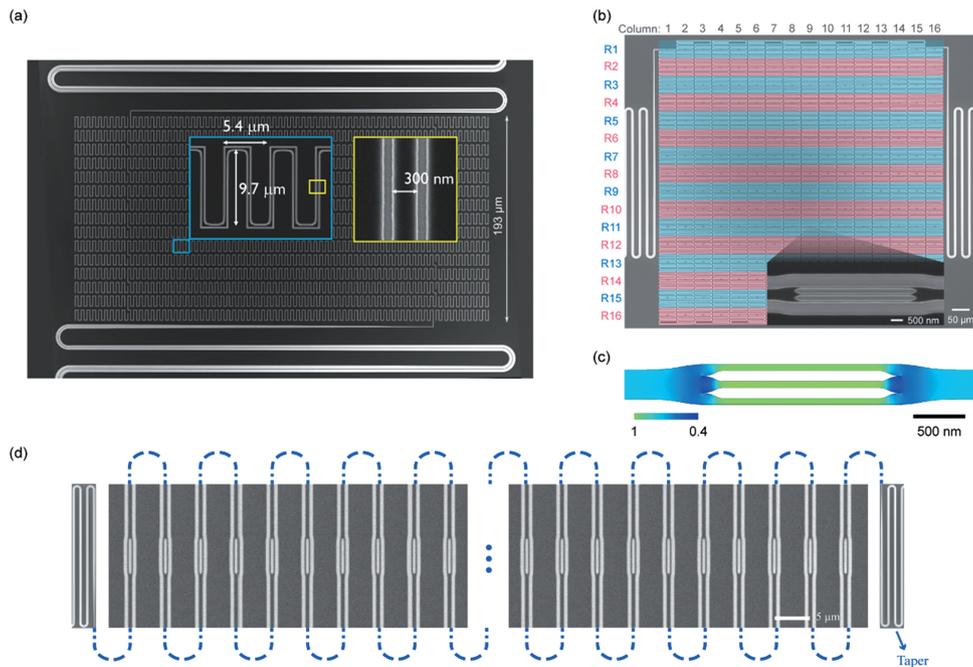


图4 不同的超导纳米线延迟线成像器几何结构。(a)纳米线同时充当探测器和延迟线^[20];(b)探测器和延迟线分开,等效构建二维面阵,延迟线由宽纳米线构成,窄纳米线由并联纳米线雪崩探测器(3-SNAP)构成^[21];(c)3-SNAP的电流分布仿真结果;(d)探测器和延迟线分开,等效构建一维线阵

Fig. 4 Different geometries of superconducting nanowire delay line imagers. (a) A single nanowires both acts as a detector and a delay line^[20]; (b) detectors and delay lines are separated to build a two-dimensional array, and the delay lines are made from wide nanowires while detectors are made from 3-SNAPs^[21]; (c) simulated current distribution in a 3-SNAP; (d) detectors and delay lines are separated to build a linear array

有着较高的有效面积填充率,继承了 SNSPD 高效率的优势。若采用微带线设计,还能够去除共面波导结构中的接地区域,结合光学腔的优化,能够将总体探测效率提高至 50% 以上。采用连续的纳米线实现高密度区域,能够实现高的探测效率,但受制于纳米线均匀性的影响,不易于制备大面积的成像器件。另一种设计方式是把超导纳米线分为光响应单元和延迟线两部分^[21],如图 4(b)所示。如图 4(c)所示,每一个探测单元都是 3 根 5 μm 长、100 nm 宽的并联纳米线,也叫作超导纳米线雪崩探测器 (SNAP)。相比于单根纳米线的探测器,超导纳米线雪崩探测器的输出电脉冲的信噪比更高,从而降低了电噪声导致的时间抖动。相隔 50 μm 的像元之间由一段 300 μm 长的延迟线连接。延迟线中脉冲传输速度约为 9 $\mu\text{m}/\text{ps}$,因此每段延迟线可以提供大约 33 ps 的时间延迟。为了匹配雪崩探测器的特征阻抗,延迟线的宽度设计为 553 nm。探测器和延迟线之间的连接部分通过仿真进行优化,以避免电流堵塞效应,从而最大化器件的临界电流并且减少暗计数。当雪崩探测器偏置在临界电流附近时,延迟线仅仅偏置在 50% 的临界电流,因此不会响应入射的单光子。这种设计方式可以大大提高成像器件的视场,并且降低制备的难度。除此之外,这种分离的结构还可以避免相邻像素之间的光学和电学串扰。但是,这种设计方式获

得的探测面积填充率很低,进而导致探测效率很低。将来可以通过集成微透镜阵列来提高光的收集效率。

除了面阵成像器件外,延迟线结构的成像器件也十分适合设计成一维的线阵器件,如图 4(d)所示。相比于面阵器件,线阵器件虽然只有一维的空间分辨,但是具有更高的空间分辨率和像素填充率。2019 年,耶鲁大学利用一维空间分辨的延迟线成像器和衍射光栅,设计了一种片上单光子光谱仪^[22],延迟线成像器为光谱仪提供了超过 200 个光谱通道,并具有进一步的扩展性。

2.3 SNSPI 基本性能表征

以分离型 SNSPI 面阵成像器件为例,介绍器件的工作原理和基本性能。图 5 为 SNSPI 读出电路的原理图。在 1.6 K 的温度下,器件的临界电流为 34.9 μA 。把器件偏置在 95% 临界电流处,用 1550 nm 波长的亚皮秒激光均匀地照射器件,以表征器件的时间和空间探测性能。使用一台 4 GHz 的示波器 (Lecroy HDO9000) 记录器件响应的一对电脉冲的到达时间 (t_1, t_2) 和激光脉冲的同步信号时间 t_0 (也可以使用时间相关单光子计数器进行快速读取)。首先需要标定好系统中每个像素时间差的所在区间,然后在实际应用时,通过判断光子响应脉冲对的时间差落在哪个区间来获得光子的到达位置。

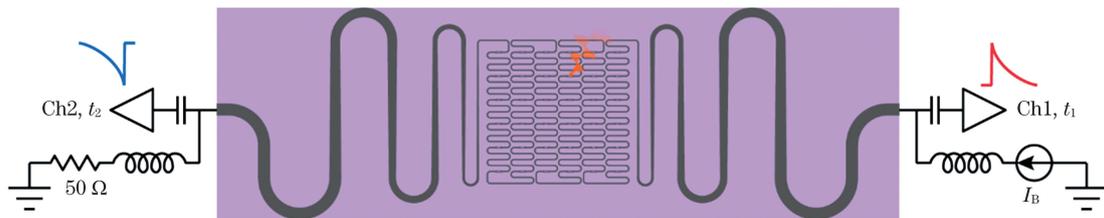


图 5 SNSPI 读出电路原理图

Fig. 5 Schematic of the readout circuit for a SNSPI

超导纳米线延迟线成像器件的典型脉冲波形如图 6(a)所示。两个脉冲的时间差 ($t_1 - t_2$) 决定成像器件中响应像元的位置。在图 6(b)、(c)中,时间差的一维分布显示出 256 个完全分开的高斯峰,其平均半峰全宽为 12 ps,相邻峰之间的平均时间间隔为 33 ps。因此,相邻峰的重叠面积小于 1%,从而确保可以准确地读出响应像元的位置。通过将时间差转化为像素位置,可以得到相应的二维图像,如图 6(d)所示。从二维图像可以看出,除了 5 个像素外,整个成像器件表现出均匀的效率。为了量化

所有像素的均匀性,对所有像素的计数值进行统计,结果如图 6(e)所示。可以看到,统计结果呈现高斯分布,它的均值 $\mu = 0.46$,标准差 $\sigma = 0.067$,说明器件有着很好的均匀性。如图 6(f)所示,光子相对于同步脉冲的到达时间 $[(t_1 + t_2)/2 - t_0]$ 用来表征超导纳米线成像器件的时间分辨率。统计分布的半峰全宽为 60 ps,这被定义为器件的时间抖动。超导纳米线成像器继承了传统的 SNSPD 的低时间抖动性能,这相比于其他 SNSPD 阵列技术而言^[18],有很大的优势。

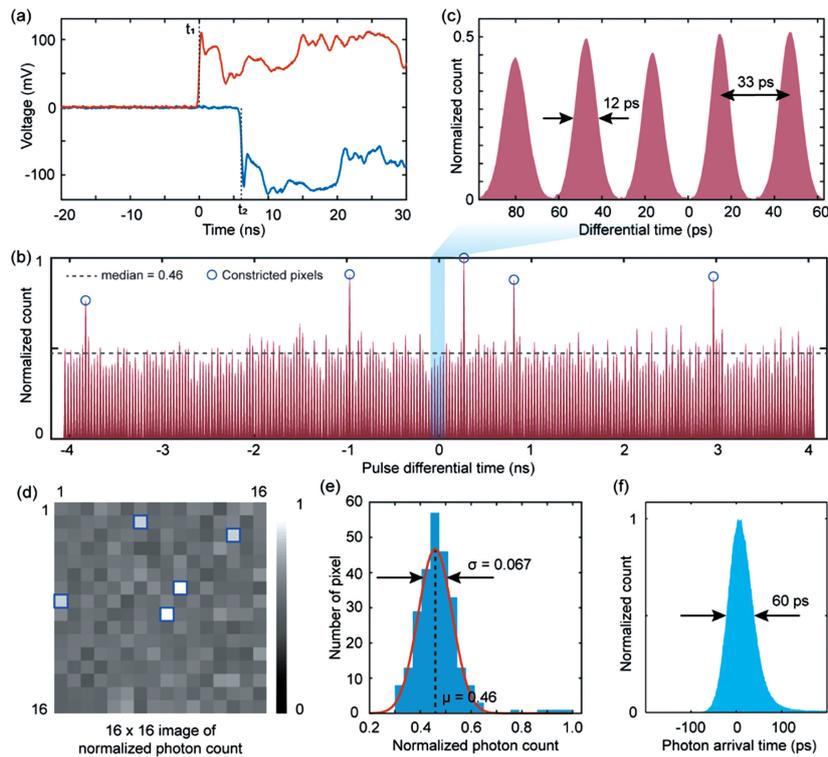


图6 SNSPI的时空探测基本性能^[21]。(a)器件两端的输出波形;(b)时间差的一维分布;(c)局部放大图;(d)归一化光子计数的二维图;(e)所有256个像素的光子计数统计;(f)光子到达时间统计,时间抖动定义为统计分布的半峰全宽,为60 ps

Fig. 6 Characteristics of the spatial and temporal detections with a SNSPI^[21]. (a) Waveforms of output pulses from the two terminals; (b) 1D histogram of the differential times; (c) enlarged view of the 1D histogram; (d) 2D map of the normalized photon counts; (e) histogram of the normalized photon counts for all 256 pixels; (f) histogram of the photon arrival times (The timing jitter is defined as the FWHM of the histogram, which is 60 ps)

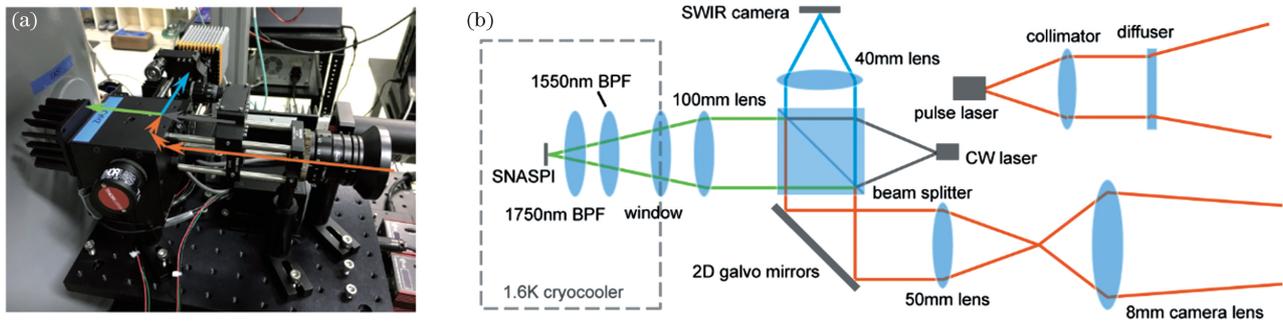
3 SNSPI在单光子成像中的应用

在单光子成像中,由于信号光子稀少,因此图像质量受背景光子的影响很严重。当前的一些少光子成像技术利用一些背景噪声去除算法,可以在背景-信号光子比($BSR; R_{BSR}$)小于25的条件下恢复出目标物体的三维图像^[23-24]。对于背景噪声这类极其强烈的场景,单光子成像的难点就变成了如何有效地区分信号光子和背景噪声光子。在主动成像中,成像系统接收的信号光子会在时间域上聚集在一起,而背景噪声光子则会均匀分布在整个时间轴上。基于这个原理,信号光子可以通过窄的时间窗口从背景噪声光子中区分开。本课题组制备的SNSPI,所有像元的总时间抖动为60 ps,继承了SNSPD低时间抖动的优点。越低的时间抖动意味着可以使用更窄的时间窗口,从而更有效地去除噪声光子。本课题组在实验上验证了高背景噪声下($R_{BSR} > 100$)的单光子成像,并证明了SNSPI低时间抖动在单光子成像中的优势。

为了描述方便,本文使用 $SBR(R_{SBR})$ 来体现去噪后的信号增强效果,使用 BSR 来体现算法抗噪声的能力,两者关系为 $R_{SBR} = 1/R_{BSR}$ 。

3.1 成像装置

图7所示为基于SNSPI的主动成像系统。一束波长为1550 nm的亚皮秒激光经过准直器和散射片后,辐照到目标物体上。为了模拟背景噪声,将一束波长为1550 nm的连续光直接照射到器件上。一对振镜把成像规模从 16×16 扩展到 256×256 。为了减少室温的热辐射对器件产生的暗计数,在1.6 K冷头上安置了一系列带通滤波器。第一个带通滤波器以1550 nm为中心,带宽为12 nm;第二个带通滤波器以1750 nm为中心,带宽为500 nm。这两个级联的带通滤波器,可以在 $0.2 \sim 12 \mu\text{m}$ 范围内提供一个以1550 nm为中心、宽度为12 nm的光学通带,从而可以在实际应用中滤除掉大部分背景光子噪声。该成像系统中的红外相机用于在实验中帮助SNSPI找到目标物体的位置,并不参与实际成像。

图7 单光子成像系统^[21]。(a)实物图;(b)原理图Fig. 7 Single-photon imaging system^[21]. (a) Photo of the imaging setup; (b) schematic of the imaging system

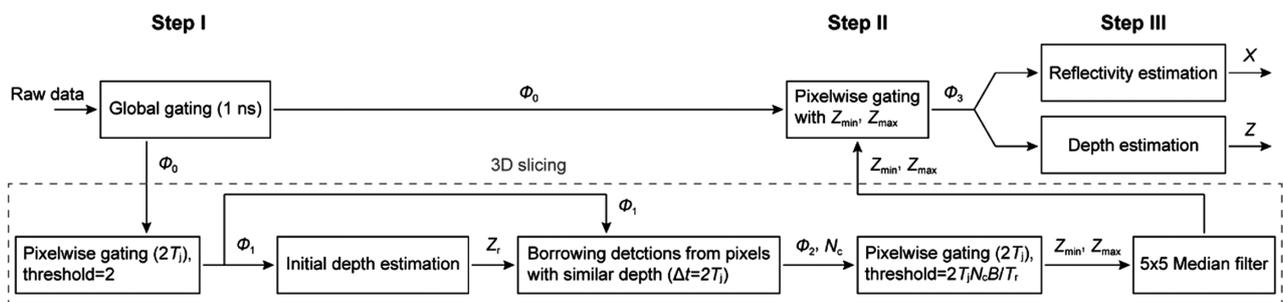
当一个从目标物体反射回来的光子在 t_p 时刻使第 n 个像素响应后,一对极性相反的脉冲产生并传向成像器件的两端,记录得到两个脉冲的到达时间 t_1 和 t_2 。利用 t_1 和 t_2 ,可以计算得到光子的到达时间 $t_p = (t_1 + t_2 - 255\tau_d)/2$ 和响应的像素索引 $n = (t_1 - t_2 + 257\tau_d)/(2\tau_d)$,其中 $\tau_d = 33$ ps,是两个相邻像元之间的延时。接着,基于器件像素的布局,可以根据像素索引 n 推算出其在二维空间中的像素位置 (n_x, n_y) 。每个光子的飞行时间 $t_f = t_p - t_0$,其中 t_0 为校正了系统的光学和电学延迟后的参考时间。最终,成像结果的数据可以表示成一个三维点云 (n_x, n_y, t_f) 。

3.2 图像重构方法

单光子成像器可以捕捉到每个光子的时间和空间信息,但是直接的成像并没有最大化地利用这些信息,导致成像质量差,甚至在噪声的影响下无法获取图像信息。一方面,传统的光子计数成像中,利用对光子进行长时间的累加,使用光子数来表征图像

的强度,利用光子的平均飞行时间来表征物体的深度。当光衰弱到每个像素只有几个光子时,在强泊松噪声的影响下,这样的方法就失效了。此外,单光子成像器对信号光子和噪声光子的采集是不加区分的,背景噪声光子的存在进一步降低了所获图像的信噪比。因此,需要利用好成像过程的数学模型以及一些物体的先验知识,最大化地利用单光子的时空信息,才能重构出清晰的目标图像。

如图8所示,图像的三维重构过程分为三大步。第一步,对所有探测到的光子时间进行统计,得到一个1 ns宽的时间门,并除去这个时间门之外的所有光子。这一步可以消除98%的噪声光子,从而产生一个新的点云 Φ_0 。第二步,为每一个像素找到一个合适的窄的时间门用于去除噪声,从而形成一个新的点云 Φ_3 ,即三维切片去噪算法(3D slicing denoising algorithm)。第三步,从去噪后的数据中,利用一些成熟的图像重构算法^[25-26]重构出物体的强度和深度图像。

图8 算法处理框图^[21]Fig. 8 Block diagram of the algorithmic process^[21]

三维时间切片去噪算法充分利用了 SNSPI 低时间抖动的优势,这是一种基于像素门去噪的方法,借鉴了 Rapp 和 Goyal 所用的超级像素的方法,目的是为每一个像素找到准确的滤波时间窗,并且尽可能地减小像素门的宽度。首先,针对每一个像素,

选用一个 120 ps(器件时间抖动的 2 倍)的时间窗口对时序光子序列进行扫描。若在此时间窗口内存在至少 2 个光子的聚敛,则此时间窗口内的光子被保留;反之,若此时间窗口内仅存在 1 个光子,则将此光子去除。利用经过这一步粗略的滤波后所剩余的

数据构建点云 Φ_1 。其次,利用深度估计算法^[26]得到一个初始的深度图 Z_r 。尽管这个深度信息有着很大的误差,但是可以作为后一步的参考深度。接下来,对于每一个像素,从与其深度相似(飞行时间相差小于 120 ps)的像素中借过来一些光子形成一个超级像素,从而形成一个新的点云 Φ_2 。然后,类似于第一步的像素门去噪,时间门依然设置为 120 ps,但是区分是否属于噪声光子的光子数强度阈值动态设置为 $2T_j N_c B/T_r$,其中 N_c 是结合成超级像素的像素数, B 是平均每个像素的背景噪声光子数, T_r 是脉冲激光的周期。对于每一个超级像素,可以找到多个聚集的光子,提取这些光子飞行时间的最小值和最大值,产生两个深度图 Z_{\min} 和 Z_{\max} 。最后,对 Z_{\min} 和 Z_{\max} 都进行 5×5 的中值滤波后,加到点云 Φ_0 中。 Z_{\min} 和 Z_{\max} 就像两块切片一样,可以将信号光子和噪声光子分离开。

为了评估三维切片去噪算法的性能,将其与其

他单光子图像重构算法^[7, 23]进行了比较。如图 9 所示,Shin 的方法^[7]比传统的匹配滤波方法更有效,但是仍然无法去除强烈的背景噪声;Rupp 和 Goyal 的方法在目标反射率较低的地方通过强度的相似性形成超级像素,去除了更多的背景噪声^[23],但在强背景噪声环境下,初始强度的估计误差逐渐增加,因而影响后续算法的重构性能。在本课题组的实验中,使用低抖动的 SNSPI,深度测量误差小;同时,在强背景噪声环境下,虽然信号回波光光子数所占比例降低,但是单个信号光子携带的深度信息测量精度不受噪声影响。因此,基于深度相似性形成超级像素,并进行三维时间切片去噪,能够取得更好的图像恢复结果。相比于其他方法,本课题组的方法在图像强度和深度重构精度上都获得了提升。在强度恢复上,峰值信噪比得到了超过 4 dB 的增强;在深度恢复上,方均根误差小于 1 cm,相比其他方法减小了约一半。

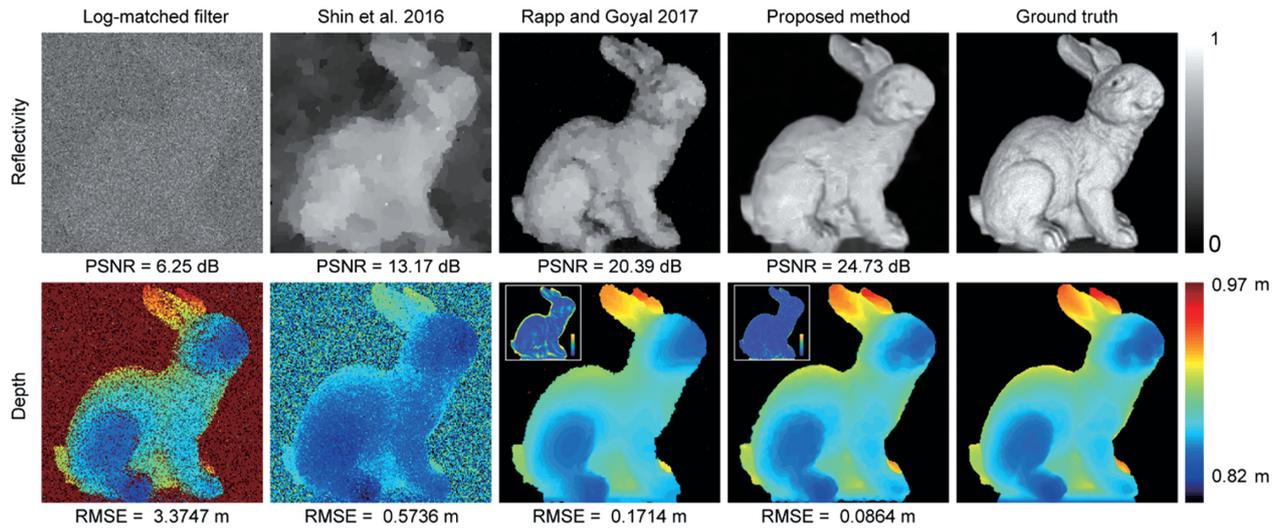


图 9 三维切片去噪算法与其他算法的性能比较^[21]

Fig. 9 Comparison of the 3D slicing denoising algorithm with the other methods^[21]

3.3 成像结果分析

在不同的 BSR 下重复了单光子成像实验。实验中,信号光子水平保持在平均一个像素内包含一个光子,通过评估强度图的峰值信噪比 (PSNR) 和深度图的平均绝对误差 (MAE) 来判断不同背景噪声下的成像效果。从图 10 可以看到,随着 BSR 的增大,PSNR 减小,MAE 也减小。如果把强度图的 PSNR 下降到 20 dB 的地方定义为成像系统的最大可容忍 BSR,可以得到超导单光子成像器能够在 $R_{\text{BSR}} = 172$ 的情况下工作。

为了分析器件时间抖动对成像效果的影响,对不同时间抖动下的去噪效果进行了仿真,结果如

图 11 所示。在仿真中,平均信号光子数设为 1,平均噪声光子数设为 100。在 60 ps 时,剩余的平均信号光子数为 0.9926,表示信号光子只损失了 0.74%;剩余的平均噪声光子数是 0.545,表示 99.45% 的噪声光子都被有效去除了。在去除噪声光子之后,SBR 从 0.01 提高到 1.82,大大提高了图像重构的质量。这也表明本课题组提出的与器件算法相结合的成像系统可获得很好的信噪选择比 (SNS),它定义为

$$R_{\text{SNS}} = 20 \times \lg \left(\frac{P_{\text{rem-sig}}/P_{\text{org-sig}}}{P_{\text{rem-noi}}/P_{\text{org-noi}}} \right), \quad (1)$$

式中: R_{SNS} 为信噪选择比; $P_{\text{rem-sig}}$ 为剩余信号光子数; $P_{\text{org-sig}}$ 为原始信号光子数; $P_{\text{rem-noi}}$ 为剩余噪声光

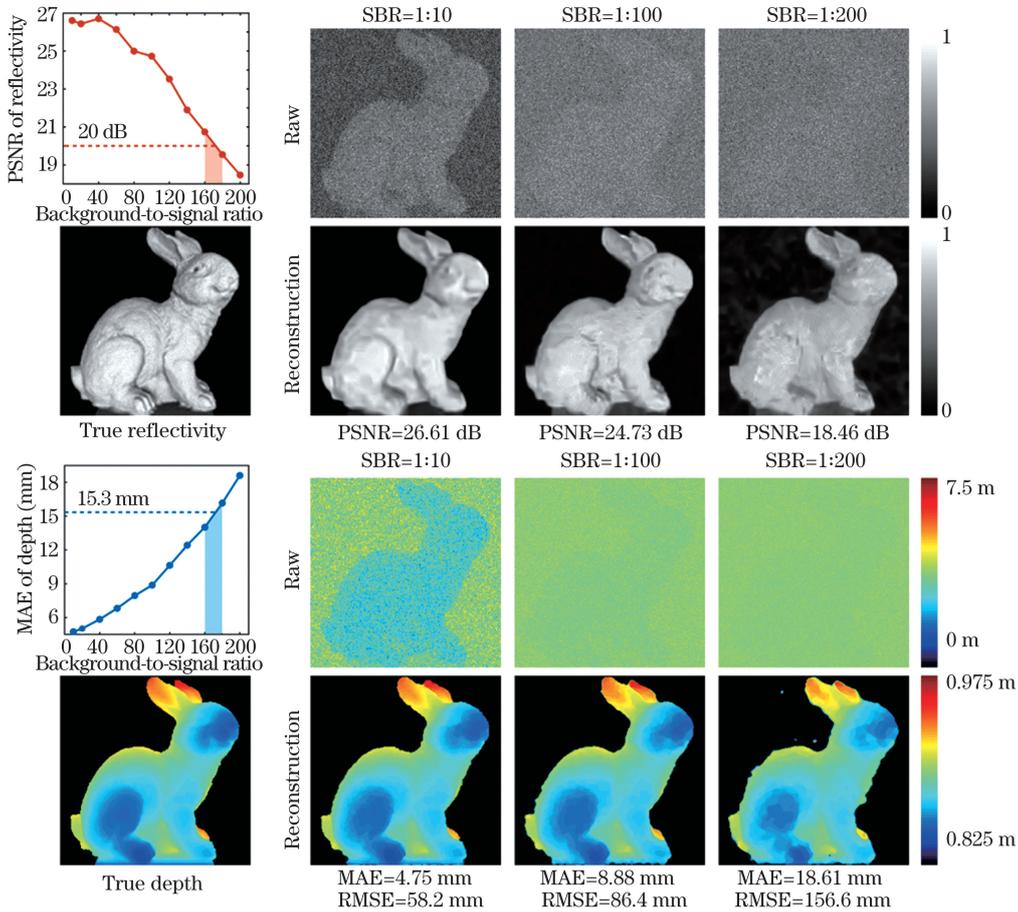


图 10 不同背景噪声下的成像结果

Fig. 10 Imaging results at different background levels

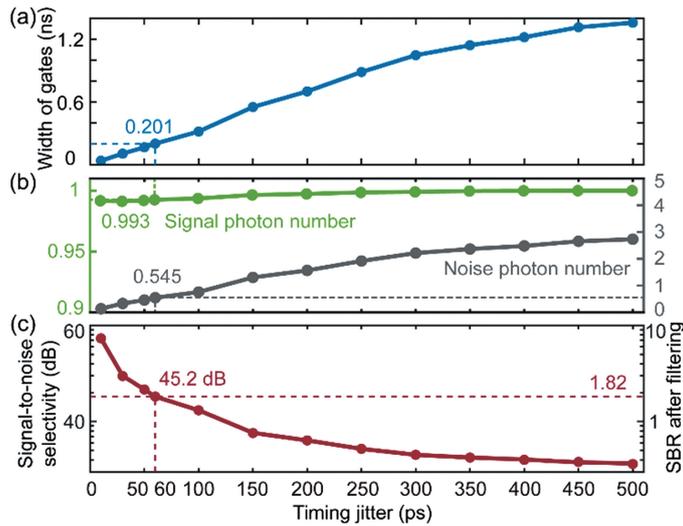


图 11 不同时间抖动下的噪声去除非性能仿真结果^[21]。(a)不同时间抖动下的像素门的平均宽度;(b)不同时间抖动下,平均每像素剩余的信号光子数和噪声光子数;(c)不同时间抖动的信噪选择比

Fig. 11 Simulation of the denoising performance at different timing jitters^[21]. (a) Average width of all pixelwise gates versus the timing jitter; (b) remaining signal photon number and noise photon number per pixel on average versus the timing jitter; (c) signal-to-noise selectivity ratio versus the timing jitter

子数; $P_{\text{orig-noi}}$ 为原始噪声光子数。因此,在 60 ps 处, SNS 达到了 45.2 dB。最新的研究成果证明单根超

导纳米线的时间抖动可以降低至 3 ps^[27]。若采用这样低时间抖动的超导纳米线单光子探测器件,可

以使 SNS 达到 67.6 dB,去噪后的 SBR 达到 24。

4 结 论

超导纳米线延迟线单光子成像器件是一种新型的超导单光子探测器,它利用超导纳米线特有的高动态电感构建低速微波延迟,通过时间逻辑的方式,实现对光子到达时刻和位置的双重读取。这种基于超导纳米线本身电学性能实现的光子位置读出,避免了使用复杂低温数字电路对超导纳米线单光子探测器阵列进行片上读取,是一种快速实现单光子成像的理想器件;同时,这种本征的读出方式保证了探测器的性能不受读出电路的影响,保留了超导纳米线单光子探测器低时间抖动的优势。因此,SNSPI 非常适合基于光子飞行时间测量的单光子成像应用。目前,SNSPI 的探测效率还受制于传输线结构导致的低占空比以及缺少集成的光学谐振腔,需要通过同时优化微波和光学设计来实现系统探测效率的提升。成像速度、探测器面积等方面还有很大的提升空间,需要从高性能超导纳米线制备、低温脉冲信号放大、高速时间测量等方面继续优化。SNSPI 基于时间延迟的读出方式,无法实现多光子同时到达事件的测量,这将影响 SNSPI 在较强光辐照下的成像效果。通过分析输出波形的特征,能够做到少数光子数的分辨,但实际应用时,需要匹配高速模数转换器^[28]。另外,结合 SNSPI 探测模型的图像重构算法的优化,也是提升系统成像能力的关键技术之一。

参 考 文 献

- [1] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1532-1540.
- [2] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919-11931.
- [3] Yu J, Zhang R L, Gao Y F, et al. Intravital confocal fluorescence lifetime imaging microscopy in the second near-infrared window [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3305-3308.
- [4] Xue L, Li Z L, Zhang L B, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3848-3851.
- [5] Altmann Y, McLaughlin S, Padgett M J, et al. Quantum-inspired computational imaging [J]. *Science*, 2018, 361(6403): 2298.
- [6] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging [J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [7] Shin D, Xu F, Venkatraman D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12046.
- [8] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338-341.
- [9] Lyons A, Tonolini F, Bocolini A, et al. Computational time-of-flight diffuse optical tomography[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(8): 575-579.
- [10] Shin D, Kirmani A, Goyal V K, et al. Photon-efficient computational 3-D and reflectivity imaging with single-photon detectors[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2015, 1(2): 112-125.
- [11] Villa F, Lussana R, Bronzi D, et al. CMOS imager with 1024 SPADs and TDCs for single-photon timing and 3-D time-of-flight[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 364-373.
- [12] Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(6): 063001.
- [13] McCarthy A, Krichel N J, Gemell N R, et al. Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8904-8915.
- [14] Zhou H, He Y H, You L X, et al. Few-photon imaging at 1550 nm using a low-timing-jitter superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14603-14611.
- [15] Gerrits T, Lum D J, Verma V, et al. Short-wave infrared compressive imaging of single photons[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15519-15527.
- [16] Miki S, Yamashita T, Wang Z, et al. A 64-pixel NbTiN superconducting nanowire single-photon detector array for spatially resolved photon detection [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7811-7820.
- [17] Miyajima S, Yabuno M, Miki S, et al. High-time-resolved 64-channel single-flux quantum-based address encoder integrated with a multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29045-29054.
- [18] Wollman E E, Verma V B, Lita A E, et al. Kilopixel array of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35279-35289.

- [19] Zheng K, Zhao Q Y, Lu H Y B, et al. A superconducting binary encoder with multigate nanowire cryotrons[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(5): 3553-3559.
- [20] Zhao Q Y, Zhu D, Calandri N, et al. Single-photon imager based on a superconducting nanowire delay line[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(4): 247-251.
- [21] Kong L D, Zhao Q Y, Zheng K, et al. Noise-tolerant single-photon imaging with a superconducting nanowire camera[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6732-6735.
- [22] Cheng R S, Zou C L, Guo X, et al. Broadband on-chip single-photon spectrometer [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [23] Rapp J, Goyal V K. A few photons among many: unmixing signal and noise for photon-efficient active imaging [J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(3): 445-459.
- [24] Lindell D B, OToole M, Wetzstein G. Single-photon 3D imaging with deep sensor fusion [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(4): 113.
- [25] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [26] Liu L K, Chan S H, Nguyen T Q. Depth reconstruction from sparse samples: representation, algorithm, and sampling [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(6): 1983-1996.
- [27] 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.
- [28] Zhu D, Zhao Q Y, Choi H, et al. A scalable multi-photon coincidence detector based on superconducting nanowires [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(7): 596-601.