

# 基于超导纳米线单光子探测技术的成像研究进展

周慧<sup>1,2\*\*</sup>, 张成俊<sup>1,2</sup>, 吕超林<sup>1,2</sup>, 张兴雨<sup>1,2</sup>, 李浩<sup>1,2,3</sup>, 尤立星<sup>1,2,3,\*</sup>, 王镇<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息学功能材料国家重点实验室, 上海, 200050;

<sup>2</sup>中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海, 200050;

<sup>3</sup>中国科学院大学材料科学与光电子工程中心, 北京, 100049

**摘要** 超导纳米线单光子探测器(SNSPD)作为一种新型的单光子探测器,相比于传统半导体或超导单光子探测器,具有高探测效率、低暗计数率、低时间抖动、高计数率和宽谱响应等优势。这使其可以应用于诸多领域,如量子通信、量子光源表征、激光测距、成像雷达等。本文将对 SNSPD 做一个简单的介绍,并着重介绍 SNSPD 在成像方面的应用进展,主要包括不同成像原理的介绍以及基于这些原理的 SNSPD 成像技术的最新研究进展,并对基于 SNSPD 成像的未来发展趋势进行了展望。

**关键词** 成像系统; 雷达; 单光子探测器; 超导纳米线单光子探测器

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011005

## Recent Progress of Imaging Applications Based on Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors

Zhou Hui<sup>1,2\*\*</sup>, Zhang Chengjun<sup>1,2</sup>, Lü Chaolin<sup>1,2</sup>,

Zhang Xingyu<sup>1,2</sup>, Li Hao<sup>1,2,3</sup>, You Lixing<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Zhen<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

<sup>2</sup> CAS Center for Excellence in Superconducting Electronics, Shanghai 200050, China;

<sup>3</sup> Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Superconducting nanowire single-photon detector (SNSPD) is a new type of single-photon detector with high detection efficiency, low dark count rate, low timing jitter, high count rate, and wide spectral response compared to traditional semiconductor single-photon detectors. This allows it to be applied in many applications, such as quantum communication, quantum light source characterization, laser ranging, quantum radar, etc. This paper will give a brief introduction to SNSPD and focus on the progress of SNSPD applications in imaging, mainly including the introduction of different imaging principles and the latest research progress of SNSPD imaging technology based on these principles, and the future development trend of this technology is prospected as well.

**Key words** imaging systems; lidar; single-photon detector; superconducting nanowire single-photon detector

**OCIS codes** 110.2970; 280.3640; 040.5570; 040.3780

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-05

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2017YFA0304000)、国家自然科学基金(61971408, 61801462)、中国科学院青年创新促进会(2021230)

\* E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn; \*\* E-mail: zhouhui@mail.sim.ac.cn

# 1 引言

从早期的粒子模型,到波动模型,再到之后的量子理论,光的本质一直是科学家研究的热点。爱因斯坦在 1905 年首次提出光是以量子形式构成的,而单光子即是构成光的最小能量单位,所携带的能量与它的频率成正比,即  $E=h\nu$ ,  $h$  为普朗克常数。自此,量子力学开始萌芽和成长,从根本上改变了人类对物质结构及其相互作用的理解。随着人们对量子理论的认识逐渐深刻以及相关科学技术的发展,人类对量子客体进行人工制备和调控已经逐渐成为现实。量子技术给众多传统技术带来了革命性的变革,从而突破了局限多年的技术上限。

量子信息科学是利用量子物理的性质通过信息处理的革新,在计算能力、通信安全性、测量精度上不断突破技术的边界。光量子信息技术作为量子信息科学的核心和关键,是以单光子为信息载体,集量子物理学、光科学工程和计算机科学等学科交叉融合发展起来的新一代信息技术。目前光量子信息光学系统涵盖了许多前沿应用领域,如基于光子偏振或相位编码的量子密钥分发、远距离激光通信、量子计算、量子雷达、生物荧光探测等。在光量子信息科学的发展过程中,单光子探测器 (SPD) 作为能够记录单个光子信息的超灵敏设备,也迎来了日新月异的发展。

根据探测器材料不同,SPD 可分为半导体单光子探测器和超导单光子探测器。根据器件探测原理不同,半导体单光子探测器又可分为光电倍增管 (PMT)、单光子雪崩光电二极管 (SPAD)、频率上转换单光子探测器 (UCSPD) 等;而超导单光子探测器可再分为超导隧道结探测器 (STJ)、超导转变沿探测器 (TES)、超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 等。衡量 SPD 性能的主要参数指标如下。

1) 系统探测效率 (SDE)。SDE 是指探测器的光响应计数  $M$  与输入到该光探测系统的总的光子数  $N$  的比值。SDE 包括了该光探测系统的光耦合传输效率、光吸收效率以及器件本征效率。对用户来讲,SDE 是 SPD 最重要的评判指标。另外,我们用本征探测效率 (IDE) 来表征除去系统光耦合损耗之外的探测器自身的效率,也可称为探测器量子探测效率 (QE)。IDE 决定了整个光电系统 SDE 的上限。

2) 暗计数。暗计数是指除了信号光以外,其他误触发引起的计数,包括环境杂散光、电噪声等。通

常我们用每秒钟暗计数的个数,即暗计数率 (DCR),表征器件的噪声水平。DCR 是 SPD 的重要性能指标,它同 SDE 一起决定了探测系统的信噪比 (SDE/DCR)。

3) 计数率/死时间。计数率也被称为最大计数率 (MCR),是指一个探测器每秒钟能够产生输出的最大光响应数目。当 SPD 接收到光信号并产生一个光响应脉冲后,有一段时间无法进行下一个光信号探测,这段无法探测光子的时间则称为死时间,器件的计数率与死时间成反比,是反映器件响应速度的重要参量。MCR 越大,探测器每秒所能接收的光子数越多,也就意味着每秒钟采集的信息越多。MCR 这一指标对于激光通信、激光雷达等格外重要,其决定了系统的动态范围。

4) 光敏面尺寸。光敏面是指器件可有效进行光子探测的光敏区域,也被称为有效区。对于激光雷达等空间光应用,SPD 一般作为整个光学接收系统的最后一级系统。为了保证光耦合效率,后一级系统的光学扩展量要大于前一级,所以 SPD 的光敏面尺寸最终决定了雷达系统光学扩展量的上限。较大的光敏面更有利于空间光信号的耦合接收,可以大幅降低光耦合系统的操作难度与复杂度。

5) 时间抖动。时间抖动是指光响应脉冲实际到达时间与理想到达时间偏差的不确定性。对于基于光子飞行时间的应用,如激光测距,探测器的时间抖动直接决定了其测距的空间分辨率。

另外,在具体应用中,SPD 的光子数分辨能力、光子能量 (光频率) 的分辨能力、光谱响应范围、有无后脉冲、输出信号的信噪比、工作温度等也是需要考量的因素。

根据上述 SPD 的性能指标评估标准,一个理想的单光子探测器,应该具有以下特性:100% 系统探测效率,零死时间,零时间抖动,并且具有光子数分辨能力,以及光子能量分辨能力。但是探测器的真实参数与理想情况具有许多偏差,这些偏差在应用过程中会对探测结果造成不同的负面影响。

不同的单光子探测器具有不同的优缺点。表 1 列举了目前常用的 SPD 的典型参数,其中部分数据来源于参考文献[1],其他数据来源于各个公司商售网站。从表 1 可以看出,基于半导体的单光子探测器工作波长大多集中在可见光波段,在红外波段探测效率较低,且相比于超导单光子探测器具有较大的暗计数。超导单光子探测器具有探测效率高、暗

计数率低、时间抖动小等特点,从性能参数上来讲更接近理想单光子探测器。但是超导单光子探测器工

作温度普遍较低,其低温制冷系统大大提高了系统复杂度与应用成本。

表 1 各种常用 SPD 的典型参数

Table 1 Typical parameters of commonly used SPDs

Detector type	Operation temperature/ K	Effective area/ mm	Wavelength range/ $\mu\text{m}$	System				Max. count rate / MHz
				detection efficiency @ wavelength / ( $\% @ \mu\text{m}$ )	Dark count rate / Hz	Timing jitter/ps	Dead time/ns	
PMT <sup>[2]</sup>	300	$\Phi 5$	0.2–1	50@0.5	100	300	50	10
IR-PMT <sup>[3]</sup>	200	$\Phi 1.6$	1–1.7	3@1.5	200000	300	50	10
Si-SPAD <sup>[4]</sup>	250	$\Phi 0.05\text{--}3$	0.5–1.0	80@0.8; 10@1.0	2000	50	100	10
InGaAs-SPAD <sup>[5]</sup>	200	$\Phi 0.05$	0.9–1.7	25–55@1.5	2000	150	10–100	10–500
SNSPD <sup>[6]</sup>	1–4	$\Phi 0.015\text{--}0.1$	0.2–9.9	> 80@0.2–1.5	100	50	50	20–500
TES <sup>[7]</sup>	0.1	$0.02 \times 0.02$	$\gamma$ -ray- millimeter wave	> 95@0.85–1.5	0	$10^3\text{--}10^5$	1000	0.1–1

然而仅从性能参数上简单判断这些 SPD 孰优孰劣是不客观的,在不同的应用场景中,不同的单光子探测器各有优势。如 PMT 的探测面积可大至数英寸,在信号耦合效率方面具有很大的优势;SPAD 体积小、成本低,易于规模化应用;SNSPD 性能优越,适用于远距离、高精度、高速率的量子探测,尤其是在量子保密通信<sup>[8–10]</sup>、量子计算<sup>[11]</sup>等方面具有不可替代的优势;TES 适用波长范围广、易开发单片集成探测器阵列,且是为数不多的具有光子数(能量)分辨率的探测器,被广泛应用于天文学中毫米波、微米波的探测,以及高能物理和核辐射探测中 X 射线以及  $\gamma$  射线的探测。

目前,国内外有非常多的生产和销售单光子探测器的研究机构和公司。基于半导体材料探测器的研产单位主要有:日本 Hamamatsu 公司、法国 Photonis 公司、瑞士 ID Quantique(IDQ)公司、俄罗斯 MELZ 公司、中国电子科技集团公司第五十五研究所、中国北方夜视公司等。基于超导探测器的研产单位主要有:赋同科技有限公司(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)、南京大学(NJU)、荷兰 Single Quantum、俄罗斯 Scontel、日本 NICT、美国国家标准与技术研究院(NIST)、美国 Photon Spot、美国 Quantum Opus 等。其中 SCONTEL 由 SNSPD 发明人 Gol'tsman 于 2004 年创立,是第一个开始进行商售 SNSPD 的公司。赋同科技是由

中国科学院上海微系统与信息技术研究所的尤立星团队于 2016 年创立,是国内唯一实现了 SNSPD 器件及系统商业化销售的公司。虽然目前超导探测器的市场比大多数半导体产品的市场小(2019 年约为 2000 万美元)<sup>[12]</sup>。但是,相信随着量子信息技术的全球投资和商业化,该市场有望继续增长。

SNSPD 作为近几年来发展最为迅速的单光子探测器,其综合性能在以上提及的各种 SPD 中处于领先地位。目前已有报道的 SNSPD 的探测波段可覆盖 X 射线高能粒子<sup>[13]</sup>到紫外<sup>[14]</sup>、可见光<sup>[15]</sup>、近中红外波段<sup>[16–17]</sup>,并且探测效率高、暗计数低、时间抖动小、计数率高、读出电路简单,且目前商用化市场趋于成熟,SNSPD 在单光子探测应用领域已经成为越来越热门的选择。本文将主要对近几年来 SNSPD 在成像应用方面的现状与进展进行概括总结。

## 2 SNSPD 简介

2001 年俄罗斯莫斯科师范大学 Gol'tsman 小组首次利用 5 nm 厚度的氮化铌(NbN)薄膜制成的单根直纳米线条成功实现了从可见光到近红外光子的探测<sup>[18–19]</sup>,由此开启了 SNSPD 研究的先河。为了提升器件的光耦合效率,进而实现高效的单光子探测,SNSPD 光敏面由单根直纳米线演变成了蜿蜒

曲折的纳米线结构。一般制备 SNSPD 的超导薄膜典型厚度为 5 nm 左右,通过电子束曝光及反应离子刻蚀等工艺方法在薄膜上做出曲折的纳米线结构,典型的线条宽度为 70~100 nm,整个纳米线的有效区域一般为  $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  的方形,或者直径为  $15\ \mu\text{m}$  左右的圆形。图 1(a)为常规圆形 SNSPD 光敏面的扫描电子显微镜(SEM)照片,器件光敏面直径为  $15\ \mu\text{m}$ 。图 1(b)为光敏面局部放大后的 SEM 照片,可见纳米线特征线宽、周期分别约为 77 nm 和 180 nm。

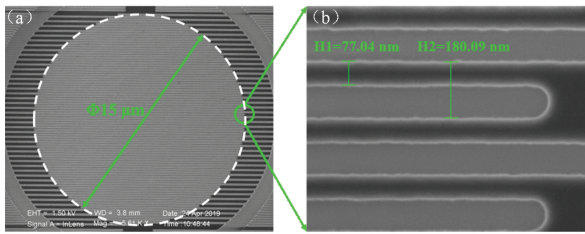


图 1 SEM 照片。(a)常规直径  $15\ \mu\text{m}$  光敏面 SNSPD 的 SEM 照片;(b)局部放大后的纳米线 SEM 照片  
Fig. 1 SEM images. (a) SEM image of SNSPD with  $15\ \mu\text{m}$  diameter photosensitive surface; (b) SEM image of nanowire after partial magnification

目前解释 SNSPD 的理论模型主要有:热点模型、准粒子扩散热点模型、磁通涡旋成核模型、磁通涡旋渡越模型等。其中热点模型是由 Gol'tsman 小组提出的最早用于解释 SNSPD 机理的模型<sup>[20]</sup>,虽然该理论并不完美,但是能够形象直观地介绍 SNSPD 的基本工作原理。

在实际应用 SNSPD 时,器件需要工作在温度小于  $1/2$  超导临界温度( $T_c$ )以下,并利用外围偏置电路给 SNSPD 器件设置一个偏置电流( $I_b$ ),该电流略小于该器件超导临界电流( $I_c$ ),如图 2(a)所示。由于 SNSPD 超导材料的能隙在 meV 量级,而单个光子能量在 1 eV 量级,所以当入射光子被纳米线吸收时,会拆散大量电子库珀对,在一定区域内产生大量准粒子,形成一块温度高于其他地方的非超导热点区域,如图 2(b)所示。该区域大小由入射光子能量与器件材料共同决定,典型大小在 10 nm 量级。非超导态的热点形成,导致原本流经该区域的电流只能从热点两边流过,使周围电流密度提升。而器件偏置电流  $I_b$  略低于临界电流,热点周围电流密度的提升超过材料本身临界电流密度,由超导态转变为有阻态,从而使该位置产生横跨整个纳米线的有阻区,如图 2(c)、(d)所示。在电流焦耳热效应

作用下,有阻区不断扩大,同时器件偏置电流  $I_b$  开始部分转移至负载阻抗( $Z_0$ )上,如图 2(e)所示。之后,有阻区热量通过衬底及有阻区两端快速扩散,使得器件再次恢复为超导态,如图 2(f)、(a)所示。当器件从超导态变为有阻态再恢复为超导态时,负载阻抗两端电压(即纳米线两端电压)会出现一个电压脉冲。通过对该电压脉冲进行检测,就可以实现单光子探测。

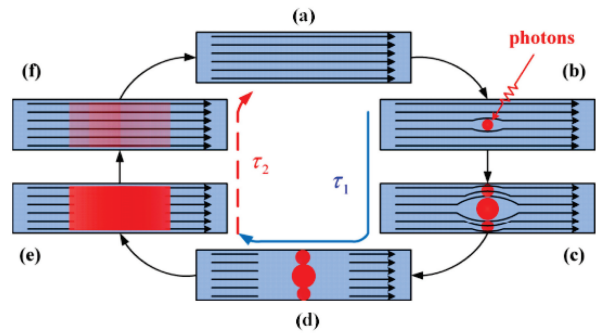


图 2 基于热点模型的 SNSPD 工作原理示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Schematics of SNSPD operation principle based on hotspot model<sup>[12]</sup>

2004 年, Semenov 等<sup>[21]</sup>提出了扩散热点模型,抛弃了“正常有阻态核心”的假设,认为有阻区的形成是准粒子扩散的动态过程,扩散热点模型与热点模型的本质区别在于,有阻区(热点)的形成是一个动态过程,不能简单地以光子能量直接换算成热点大小。这两种热点模型都阐述了 SNSPD 探测效率和光子能量一对一的关系,即当波长大于截止波长时,探测概率将会截止,然而实际研究表明了探测概率并不会随着光子能量的降低而突变到零,而是会逐渐下降。因此热点模型在光谱响应截止波长上存在严重局限性。由此,磁通涡旋被引入到 SNSPD 探测机理的模型中,并且在热点及准粒子扩散的基础上,演化成扩散涡旋模型及正常态涡旋模型<sup>[22-24]</sup>。前者涡旋是从边缘进入到纳米线当中,而后者磁通涡旋则是从热点形成处向纳米线两端运动。对于涡旋机制下的单光子探测,可按照超导纳米线吸收光子的情况归结为三个方面:1)光子能量足够大,可以破坏足够多的库珀对,直接触发超导态到有阻态的转变;2)无光子的情况下,热致涡旋在洛伦兹力的作用下横穿纳米线释放的能量触发状态转变,其对应 SNSPD 的暗计数;3)光子能量较小不足以触发状态转变,但其可以触发涡旋的产生,进而释放足够能量触发状态转变。虽然两种涡旋机制对截止波长、低能量光子响应、磁场相关性等方面做出了

一定程度的理论解释和实验验证,但在对待涡旋的理论处理方式,尤其是光谱响应中光子能量-偏置电流的线性或非线性关系上依然存在很大争议和问题。

SNSPD 的响应波段可实现从 X 射线到中红外的全覆盖。在应用较多的特征波长,如 532, 850, 1064, 1550 nm 等, SDE 均突破了 80% 甚至 90%, 近期在 1590 nm 更是实现了 98% 的探测效率<sup>[25]</sup>。另外,针对各指标优化的 SNSPD 可实现 DCR 小于 0.1 Hz<sup>[26-27]</sup>, 时间抖动 3 ps<sup>[28]</sup>, MCR 超过 GHz<sup>[29]</sup>。尤其在基于单光子探测的成像应用中,极限成像距离主要由成像系统的灵敏度决定,即探测器的 SDE 决定,而在这一方面, SNSPD 相比较于其他单光子探测器具有压倒性的优势。图 3 较为详细地列举了国内外各研究机构和公司在各个常用波段不同单光子探测器的 SDE 参数,其中三角形为商售半导体 SPD 性能<sup>[5]</sup>, 正方形为中国科学院上海微系统与信息技术研究所报道的 SNSPD 性能<sup>[25, 30-33]</sup>, 球形为国内外其他机构报道的 SNSPD 性能<sup>[14, 30-31, 34-36]</sup>, 可以看出 SNSPD 的优势相当明显,尤其是在红外波段。

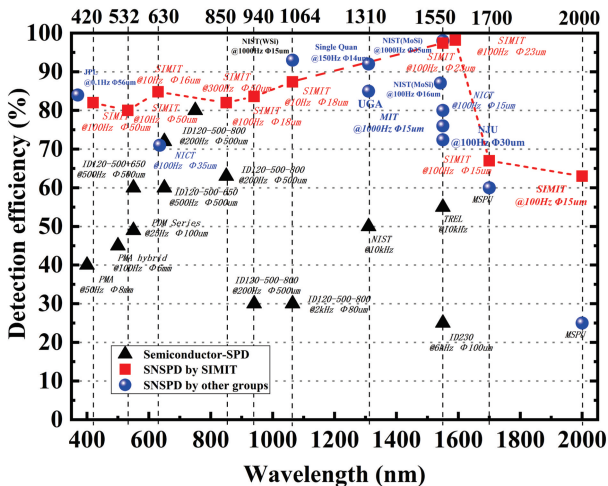


图 3 不同探测器 SDE 性能比较<sup>[5, 14, 25, 30-36]</sup>

Fig. 3 SDE performance comparison of different SPDs<sup>[5, 14, 25, 30-36]</sup>

### 3 基于 SNSPD 的成像技术

雷达系统可以有效探测目标物的距离、速度、强度等信息,已被广泛应用于各个领域,其中包括精确跟踪、远程遥感、地形测绘等。单光子探测器在雷达系统中的应用使其突破了传统光学技术的极限,光学雷达成像也逐渐向量子成像发展,其技术方向主

要包括三点<sup>[37]</sup>: 1) 发射经典光源(激光),使用单光子探测器来提升性能; 2) 发射纠缠态的量子光源; 3) 发射非纠缠态的单光子。基于这几种技术路线,逐渐发展起了基于光子飞行时间(ToF)的测距成像,以及基于光子在空间或时域上相关性的关联成像。本文着重介绍 SNSPD 作为单光子探测工具在这两种成像技术中的应用进展。

#### 3.1 基于单像素 SNSPD 的飞行时间测距成像

在利用经典光源的激光测距和成像中,距离信息的获取方式主要有三种:基于幅度或频率调制光源的相干探测、基于激光脉冲飞行时间的直接探测以及激光三角测量法。相干探测是测量发射信号和接收探测信号之间的相位或频率差异,通过差异的信息确定目标的范围<sup>[38]</sup>;而直接探测则是通过测量脉冲的飞行时间来确定距离<sup>[39]</sup>;激光三角测量法则是利用光线空间传播过程中的光学反射规律和相似三角形原理,利用边角关系计算出待测位移<sup>[40]</sup>。其中基于 ToF 的直接探测是空间测距中最直接也是应用最多的方法。这种方法无需对光源进行调制,不易受干扰,具有很高的信噪比,更适合如军事、航天领域等远距离应用,同时也是最能直接体现 SPD 优势的测量方法。

ToF 测距技术是指光源发出脉冲光,遇到被测物后反射,通过计算光源发射与反射的时间差来计算被测物的距离。随着 SPD 在激光雷达中的应用, ToF 技术逐渐与时间相关单光子计数(TCSPC)技术相结合。TCSPC 技术是由 Bollinger、Bennett、Koechlin 三人一起建立起来的。TCSPC 凭借高时间分辨率、高灵敏度、高测量精度、大动态范围、输出数据数字化等优势,在荧光寿命测量、时间分布光谱等许多领域具有广泛应用。TCSPC 基本原理为在记录强度低、重复频率高的脉冲信号时,通过测量每个单光子脉冲出现时间,并送入对应时间通道,建立光子时间分布直方图,如图 4(a)所示<sup>[41]</sup>。基于 TCSPC 技术的 ToF 激光测距系统工作的流程如图 4(b)所示。选用脉冲激光光源的同步信号作为 TCSPC 系统的开始(Start)信号,启动光子计数过程。另一方面,脉冲激光光源通过光学聚焦整形照射到目标物体上,再通过光的返回接收耦合进入探测器,再将探测器的输出信号接入 TCSPC 系统的停止(Stop)端,记录整个系统的延时,从而计算出目标物体距离。

TCSPC 技术结合极限灵敏度的 SNSPD,可以将激光雷达的测量距离大幅度提高,达到万 km 级

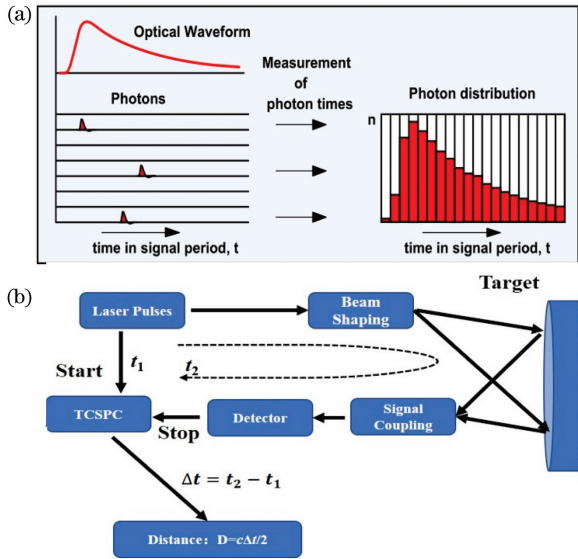


图 4 TCSPC 技术。(a)TCSPC 技术原理图<sup>[41]</sup>；(b)基于 TCSPC 的激光雷达原理图  
Fig. 4 TCSPC technology. (a) Schematic diagram of TCSPC technology<sup>[41]</sup>；(b) schematic diagram of TCSPC-based Lidar

别,同时其低抖动特性可以保持较高的测量精度。激光成像雷达常使用扫描成像的方式,通过扫描测量发射激光光束的飞行时间,实现对一个场景的三维(3D)成像,飞行时间的测量提供深度信息,二维扫描提供该深度的方位信息,整合后通过有效的数据处理重构出场景的三维图像。

2007 年,英国赫瑞瓦特大学 Buller 团队首先报道了使用 1550 nm 波段低时间抖动 ( $< 70$  ps) SNSPD 的测距系统,在 330 m 的测试距离下实现了 1 cm 的测试精度<sup>[42]</sup>。选用 1550 nm 波长作为工作波段可以有效降低太阳背景光的影响,同时对人眼安全,隐蔽性高。此外,1550 nm 波段大气穿透率高,可以实现卫星测距。SNSPD 器件在此波段表现出的优异性能,使之成为近红外测距探测器最优之选。2013 年,该团队率先将 1560 nm 波段 SNSPD 器件引入飞行时间深度成像系统中(图 5),在日光下实现了 1 km 外的物体成像,并获得 cm 量级的分辨率<sup>[43]</sup>。

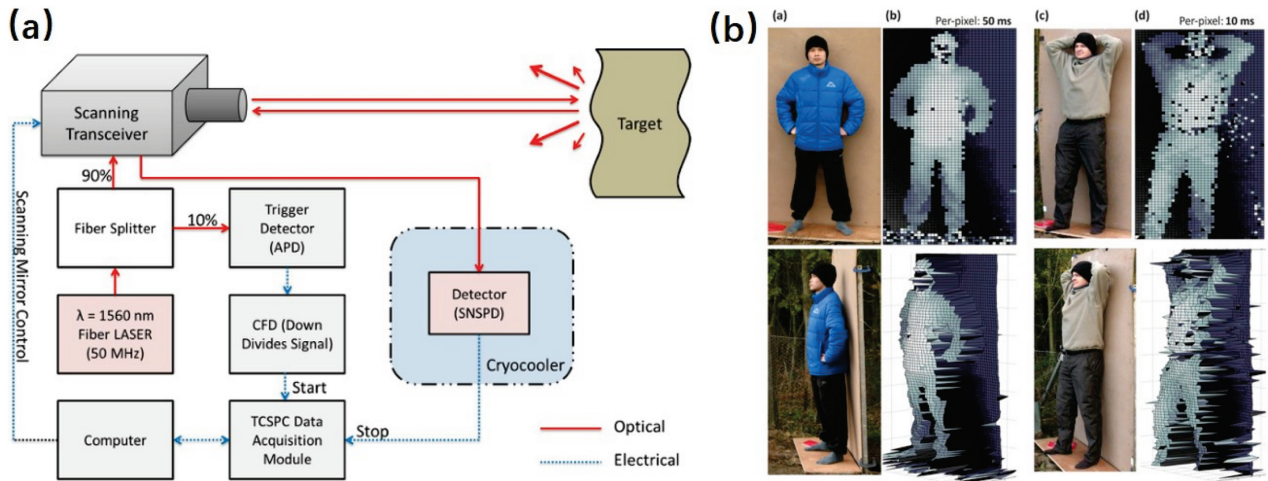


图 5 SNSPD 的测距系统。(a)基于 SNSPD 的扫描成像系统；(b)不同视场下 1 km 距离成像结果<sup>[43]</sup>  
Fig. 5 SNSPD ranging system. (a) Scanning imaging system based on SNSPD；(b) 1 km distance imaging results at different viewpoints of the scenes<sup>[43]</sup>

随着国内 SNSPD 研制水平的逐步提升,国内研究机构也开始开展一系列基于 SNSPD 的激光测距工作。2015 年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所与中国科学院上海天文台合作,在国际上首次利用 SNSPD 开展 532 nm 波长的卫星激光测距(图 6),利用 60 cm 口径望远镜,完成对 3000 km 外的 LARES 卫星的测距,精度达到 8 mm<sup>[15]</sup>；2016 年初,经过进一步优化系统,成功观测到近  $2 \times 10^4$  km 的俄罗斯 Glonass 卫星,精度约 2 cm。同年,北京跟踪与

通信技术研究所、中国科学院云南天文台和南京大学合作,利用 532 nm 波段 SNSPD 在 237 m 和 19 km 范围内开展非合作目标的激光测距实验,其测量精度达到 cm 级<sup>[44]</sup>；随后,又利用 1064 nm 波段 SNSPD 开展卫星激光测距实验,三个不同高度的卫星 Cryosat、Ajisai 和 Glonass 在 1600 km、3100 km 和 19500 km 的高度上分别实现  $1200 \text{ min}^{-1}$ 、 $4200 \text{ min}^{-1}$  和  $320 \text{ min}^{-1}$  的平均回波率,测距精度分别为 7.6, 8.1, 7.86 cm<sup>[45]</sup>。2017 年,南京大学利用 SNSPD

实现了用于海雾分布特征测量的远距激光雷达,将测距范围扩大到 180 km 直径的区域<sup>[46]</sup>;同年,中国

科学技术大学利用 1550 nm 波段 SNSPD 开发多普勒激光雷达,用光来准确测量风速<sup>[47]</sup>。

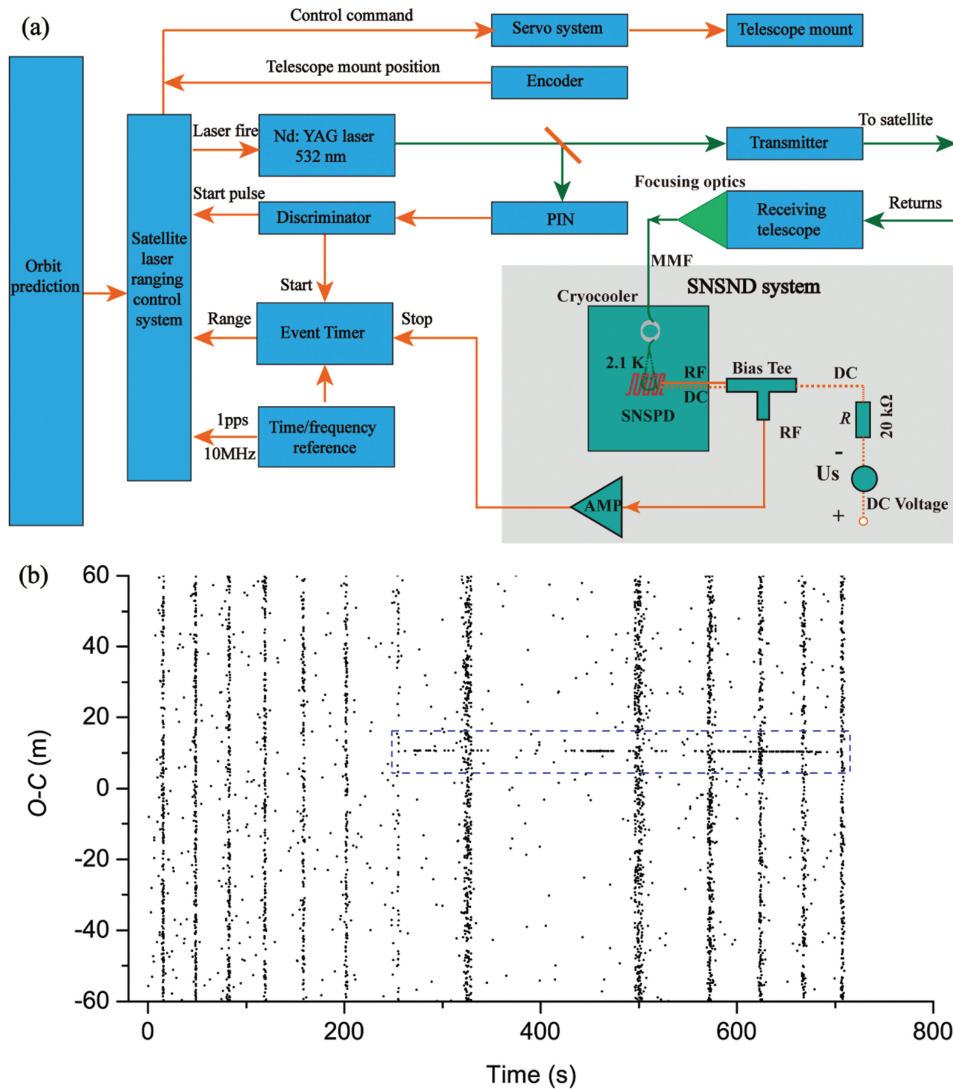


图 6 基于 SNSPD 的激光测距。(a)基于 SNSPD 的 3000 km 外 LARES 卫星测距系统示意图;(b)测距结果图<sup>[15]</sup>

Fig. 6 Laser ranging based on SNSPD. (a) Schematics of the LARES satellite ranging system 3000 km away based on SNSPD; (b) ranging result<sup>[15]</sup>

除此之外,在基于 SNSPD 的飞行时间高精度成像方面,国内外也利用低抖动的 SNSPD 开展了一系列的工作。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<sup>[48]</sup>;2015 年,经过系统优化,成功实现 1550 nm 波段的具有毫米分辨率的少光子深度成像系统<sup>[49]</sup>;2020 年,美国喷气推进(JPL)实验室与麻省理工学院(MIT)合作实现了时间抖动约 3 ps 的高精度 SNSPD,成像精度达到了亚毫米级别(图 7)<sup>[28]</sup>。

2020 年,中国科学院深圳先进技术研究院与南京大学合作,实现了高精度的生物荧光寿命成像(图 8)<sup>[50]</sup>。

### 3.2 基于多像素 SNSPD 的飞行时间测距成像

随着单像素 SNSPD 性能的提升,制备 SNSPD 阵列也逐渐成为热点,实现真正位置可分辨的多像素 SNSPD 将会大大拓展其应用范围,除了能获得更大的探测面积,还能大大缩短成像时间。阵列化 SNSPD 一方面受限于加工技术,即如何制备大规模且均匀性良好的纳米线条;另一方面受限于信号读出,即如何准确地判断并获取每个像元的位置信息。

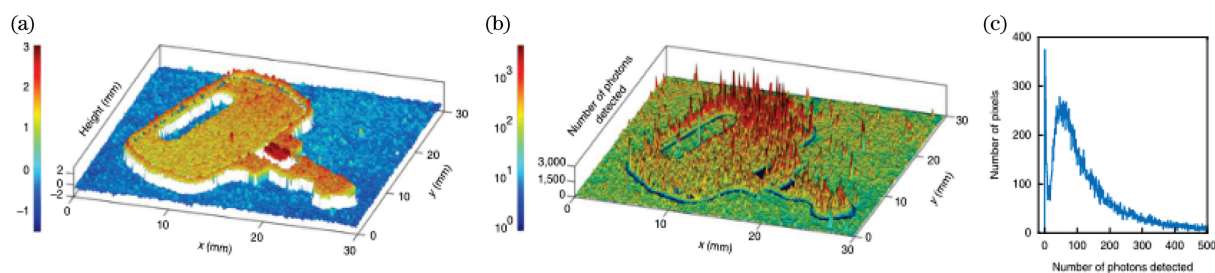


图 7 亚毫米精度的少光子扫描成像。(a)通过检测和标记反射光子

实现小钥匙的轮廓重建;(b)每像素信号采集时间为 20 ms 时的回波强度分布;(c)扫描像素中探测到的光子数分布<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Few-photon scanning imaging with sub-millimeter depth resolution. (a) Reconstructed profile of a small key achieved by detecting and time-tagging reflected photons; (b) dwell time at each position of the scan was fixed to 20 ms meaning that the number of detected photons was different at each location; (c) distribution of the detected number of photons in the pixels of the scan<sup>[28]</sup>

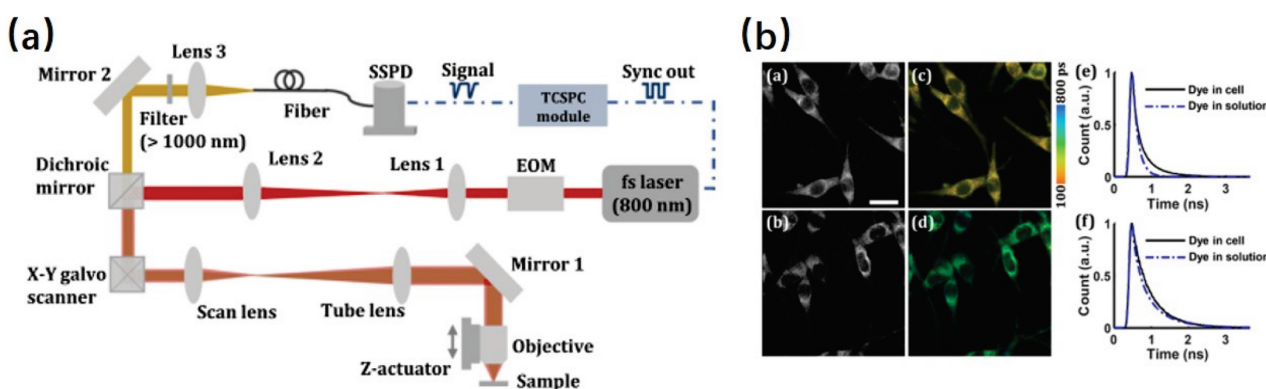


图 8 生物荧光寿命成像。(a)基于 SNSPD 的共聚焦荧光寿命成像显微镜的示意图;(b)大鼠胶质瘤细胞的 NIR-II 共聚焦荧光寿命成像<sup>[50]</sup>

Fig. 8 Bioluminescence lifetime imaging. (a) Schematic diagram of confocal fluorescence lifetime imaging microscope based on SNSPD; (b) NIR-II confocal fluorescence lifetime imaging of rat glioma cells<sup>[50]</sup>

2017 年,MIT 的研究人员采用基于延时线的双端读出方式,将传统 SNSPD 的蜿蜒纳米线结构替换为共面波导结构<sup>[51]</sup>,如图 9(a)所示,成功实现了约 590 pixel 的单光子成像的演示实验。当有光子入射到光敏面区域时,将会产生两个极性相反的脉冲信号,向器件的两端传输。由于纳米线上信号传输速度较慢,光子入射的位置将会影响这两个脉冲传输到器件两端的时间差,通过统计时间差便可以推算出光子入射的时间和位置。2020 年,南京大学在该多像素双端读出方法的基础上,还引入了自适应 3D 切片算法,为每个像素提供最佳时窗[图 9(b)]。结合 SNSPD 的高灵敏度、低暗计数和低时间抖动的特性,最终该小组在低信号水平(每个像素 1 个平均光子)和极高背景噪声中,取出了 99.45% 的噪声光子信息,完成了信号光子提取和 3D 单光子图像重构<sup>[52]</sup>。

除此之外,2014 年,美国 NIST 小组提出了一

种行-列复用读出方式<sup>[53]</sup>,通过检测行放大器和列放大器的输出脉冲判断入射光子的位置。2019 年,该小组在此基础上实现了对于 32×32 阵列 SNSPD (光敏面达到 1.6 mm×1.6 mm)的读出,如图 10 所示,基于该技术该小组成功完成了千像素阵列、毫米尺度的成像实验演示<sup>[54]</sup>。

### 3.3 基于 SNSPD 的关联成像(单像素成像)

不同于经典的光学成像,关联成像(又称鬼成像)是通过提取光强的涨落特性完成关联探测获得目标的非局域性成像。鬼成像是基于双光路的成像(图 11),其中一束光作用于目标物体,然后照射在一个没有空间分辨率的单像素探测器(桶探测器)。另一束光不和物体相互作用,直接照射在一个具有高分辨率的相机上。单独一个光路都得不到物体的像,只有将两路信号经过复合运算,才可以得到物体的像,因此人们称其为“鬼成像”。作为近年来量子光学领域的热点问题之一,鬼成像已经打破了发展



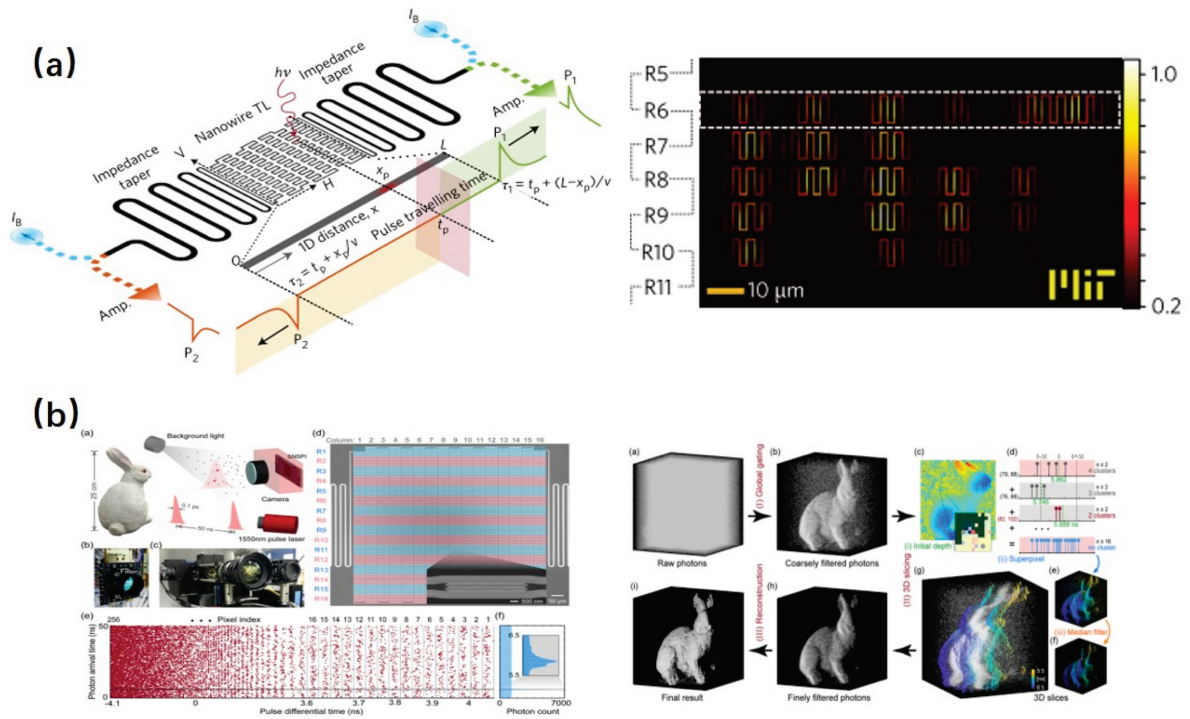


图 9 实验结果。(a)基于双端读出技术的多像素 SNSPD 示意图和 590 pixel 单光子成像演示实验<sup>[51]</sup>。

(b)基于双端读出技术的多像素 SNSPD 相机和 16 pixel×16 pixel 3D 单光子图像重构过程<sup>[52]</sup>

Fig. 9 Experimental results. (a) Multi-pixel SNSPD schematic diagram based on double-ended readout technology and 590 pixel single-photon imaging demonstration experiment<sup>[51]</sup>; (b) multi-pixel SNSPD camera and 16 pixel×16 pixel 3D single-photon image reconstruction process based on dual-end readout technology<sup>[52]</sup>

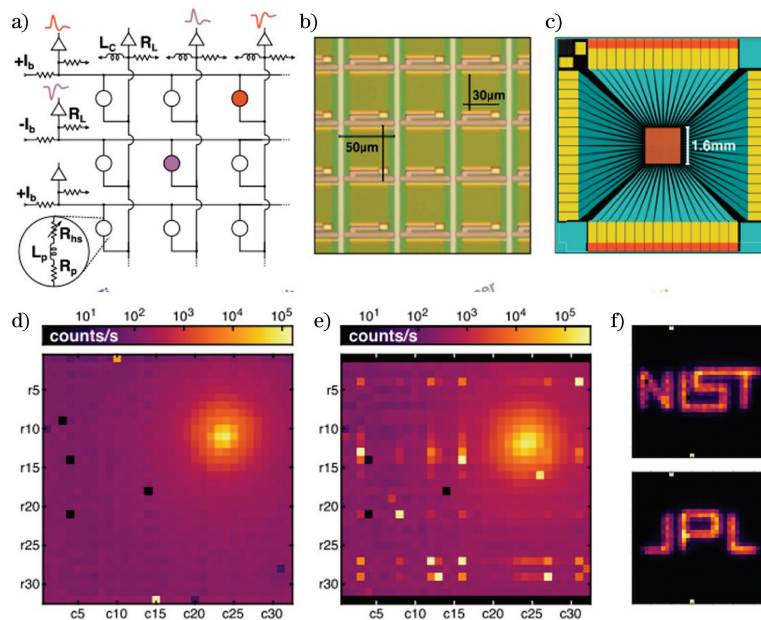


图 10 实验结果。(a)利用行-列复用读出的千像素阵列 SNSPD 示意图;(b)阵列光学显微照片;(c)阵列的芯片级布局图;

(d)(e)在聚焦激光束的照射下,整个阵列的对数刻度计数率;(f)激光光斑扫过阵列时的持久性图像<sup>[54]</sup>

Fig. 10 Experimental results. (a) Schematic of thousand-pixel array SNSPD read by row-column array; (b) optical micrograph of the array; (c) chip-scale layout of the array; (d)(e) log-scale count rate across the array under illumination with a focused laser beam; (f) persistence images when the laser spot sweeps across the array<sup>[54]</sup>

初期只能采用双光子纠缠光源的限制,目前采用赝热光源与真热光源都可实现关联成像,大大拓展了其应用范围。同时由于其具有可突破衍射极限的性质和独特的非定域成像方式,鬼成像被广泛应用于多个领域,如高分辨光刻、荧光成像、光学加密、光学成像、隐身技术等。1995 年,首例鬼成像实验由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光子对完成<sup>[55]</sup>。在利用纠缠光源实现鬼成像不久,Rochester 大学的 Boyd 小组首先实现利用经典光源的鬼成像实验<sup>[56]</sup>。首例经典光源鬼成像出现不久,赝热光源鬼成像就被通过理论和实验证实是可行的<sup>[57]</sup>。与纠缠光源鬼成像相比,赝热光源鬼成像易于完成,其出现大大加速了鬼成像的发展。目前,大多数经典光源鬼成像都是以赝热光源作为光源。2005 年,中国科学院物理研究所的吴令安小组首次使用真热光源实现了量子成像<sup>[58]</sup>。

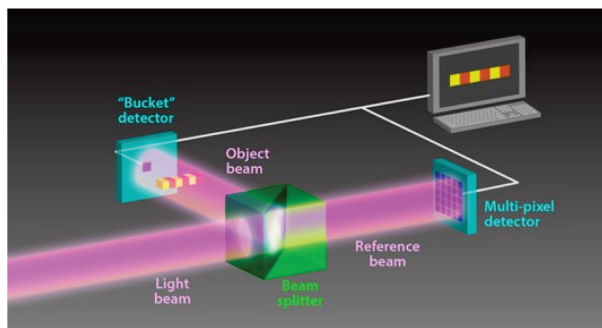


图 11 鬼成像示意图<sup>[59]</sup>

Fig. 11 Schematic of ghost imaging<sup>[59]</sup>

2006 年,Rice 大学的 Takhar 等<sup>[60]</sup>在美国圣何塞市举办的国际光学工程学会计算成像第四次会议上初次提出压缩成像照相机,利用数字微镜元件(DMD)或者空间光调制器 SLM 产生预置光强涨落的光源打在物体表面,取代了 CCD,成为单像素相机的雏形。2008 年 3 月,Rice 大学 Duarte 等<sup>[61]</sup>正式发表了“单像素照相机”方案,并详细介绍了压缩感知理论及其相关算法。如图 12 所示,单像素相机基于关联测量原理,仅仅依靠收集光的强度信息对物体成像。单像素相机在照明端采取结构光照明,在探测端采用单像素光强探测器收集信号。当照明结构发生变化时,相应的物光光强的变化反映出照明结构与物体空间信息之间的关联程度。通过不断变化照明结构并累积关联信息,最终实现对物体的成像。由于单像素相机在探测端只需要光强探测,它对探测器的要求远远低于普通成像中的面阵探测器。而压缩感知可以在远小于奈奎斯特采样样本的

条件下,通过增加约束条件精准地恢复出原始信号。将压缩感知与单像素相机结合能够有效地减少采样次数,极大地缩短成像的时间。

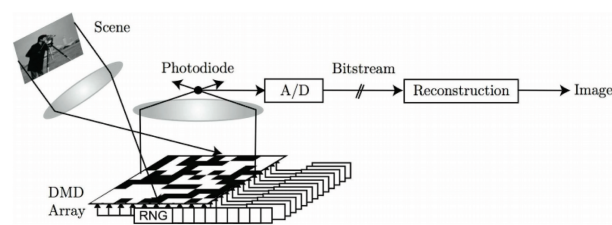


图 12 单像素相机原理示意图<sup>[60]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of single-pixel imaging<sup>[60]</sup>

成像灵敏度是衡量成像性能的一项重要指标,主要反映光学系统对光信号的响应能力。随着单像素相机的实用化发展,人们希望成像距离越来越远,这都会导致探测器接收到的光子数越来越少甚至是单光子的水平,因此提高成像灵敏度至关重要,其首选方案就是采用灵敏度高的探测器。目前单像素相机中使用的桶探测器大部分为 PMT 和 SPAD<sup>[62]</sup>,根据前文的比较可知, SNSPD 在灵敏度、暗计数以及时间精度方面都远远优于前两种探测器,尤其是 SNSPD 在近红外到中红外波段的极高灵敏度将会为此波段的单像素量子遥感提供可行性方案。

2015 年,华南师范大学首次将 SNSPD 应用于 3D 压缩全息成像,将 Mach-Zehnder 干涉仪设置与基于压缩感知的单像素成像技术相结合,实现了全光域的全息图采集,为超高灵敏度的动态 3D 成像和全光加密通信系统提供了一种有效的解决方案<sup>[63]</sup>。为解决传统光纤耦合的 SNSPD 数值孔径小、耦合效率低的问题,2015 年,NIST 的 Gerrits 等<sup>[64]</sup>在 CLEO 会议上报道了基于  $8 \times 8$  阵列 SNSPD 的压缩感知成像。2018 年,该小组又报道了基于多模光纤耦合的单个 SNSPD 压缩感知成像<sup>[65]</sup>,利用 SNSPD 的高信噪比特性(高效率、低暗计数)实现了高背景噪声环境下百万像素分辨率的单光子成像,同时利用 SNSPD 的高时间分辨率,结合 TCSPC 技术在短波红外区域实现亚纳秒成像,如图 13 所示。这项技术体现了基于 SNSPD 的压缩感知成像在微弱图像采集方面的优势,为痕量气体探测、快速过程(荧光)成像、3D 成像以及多光谱成像提供了新思路。除此之外,2016 年,清华大学提出时域鬼成像的概念<sup>[66]</sup>,并于 2018 年利用 SNSPD 验证了基于热光源时域鬼成像的可行性<sup>[67]</sup>。同年,该小组利用 4 个高性能 SNSPD 将量子密钥分发技术与鬼成像技术相结合实现了量子安

全鬼成像<sup>[68]</sup>,为安全成像与监控提供了新的想法。基于 SNSPD 在近红外到中红外波段均具有极高灵

敏度的优势,这些技术完全可以扩展到中红外波段,为大气窗口的红外量子安全遥感提供可能性。

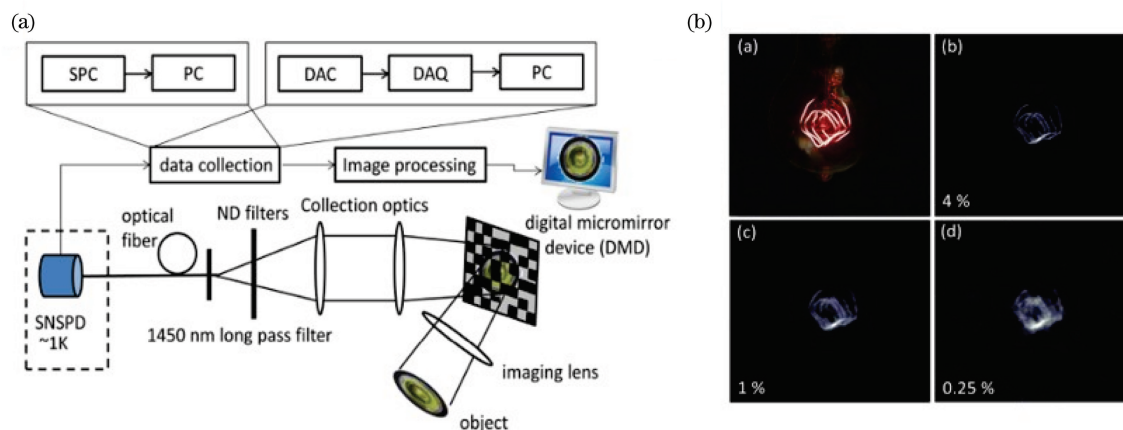


图 13 实验结果。(a)基于 SNSPD 的压缩感知成像实验示意图;(b)成像结果<sup>[65]</sup>

Fig. 13 Experimental results. (a) Schematic diagram of compressed sensing imaging experiment based on SNSPD; (b) imaging results<sup>[65]</sup>

### 3.4 基于 SNSPD 的成像技术发展优势

由激光雷达的原理可知<sup>[69]</sup>,激光雷达接收到的回波信号强度与探测距离的平方成反比,随着探测距离的增加,信号强度会急剧减弱,且信号在来回飞行过程中会受到大气的散射和吸收,这就导致了回波信号强度的进一步减弱<sup>[70]</sup>。当回波光子数极弱甚至低至个位数时,若探测器的信噪比低(SDE/DCR),则回波信号容易被噪声淹没,无法进行有效测量。无论是基于飞行时间的单光子增强成像技术,还是基于光强的涨落特性的关联成像技术,探测器的信噪比都决定了成像系统的灵敏度。SNSPD 作为目前综合性能最接近理想探测器的 SPD,其信

噪比相比于其他 SPD 在成像方面的优势是毋庸置疑的。兰州理工大学张晓英等<sup>[71]</sup>曾经直观地比较过基于 SNSPD (SDE/DCR = 40%/2 Hz)与 SPAD (SDE/DCR = 2%/2000 Hz)的激光测距系统性能。从表 2 可以看出,在探测弱信号回波光时, SNSPD 的探测性能远远优于 SPAD,这主要就是归功于 SNSPD 的高信噪比特征。除此之外,目前 SNSPD 已经可以在 SDE 达到 80%以上的同时具有 10 ps 以下的极低时间抖动<sup>[72]</sup>,这就意味着在卫星测绘<sup>[73]</sup>、海上目标成像<sup>[46]</sup>、武器制导<sup>[74]</sup>等远距离、高精度三维成像应用中, SNSPD 将具有巨大的应用前景。

表 2 不同回波强度下激光测距实验结果<sup>[71]</sup>

Table 2 Experimental results of laser ranging under different echo intensities<sup>[71]</sup>

Attenuation factor/dB	Echo photon number/Hz	SPAD	SNSPD	SPAD	SNSPD
		Average range of detection /km		Experimental detection probability /%	
10	120	10.52	10.51	80	95
30	42	10.56	10.53	35	75
60	20	11.25	10.52	20	60
120	8	12.47	10.52	0.29	35

除此之外,目前 SNSPD 的响应波长已拓展到 10  $\mu\text{m}$  附近<sup>[17]</sup>,这为中红外单光子探测领域带来了新的契机。尤其是在分子指纹光谱探测方面,中红外 SNSPD 探测技术的引入为超快时间分辨红外分子光谱技术提供了实现途径,近期德国马克斯-普朗克研究所在基于 SNSPD 探测的分子表面化学反应

动力学的研究工作中取得了一系列令人瞩目的成果<sup>[75-77]</sup>。该团队同时比较了基于 SNSPD 和传统碲化铟(InSb)中红外探测器的分子光谱探测系统性能<sup>[78]</sup>,如表 3 所示,基于 SNSPD 的单色仪的等效噪声功率(NEP)比 InSb 低了两个数量级,并且时间精度高了 3 个数量级。同时在生物物理、生物化学以

及临床诊断等领域中,高精度的中红外 SNSPD 将  
为一些超短寿命荧光成像提供可能性,从而提升呼

吸气体分析光谱技术的应用范围与精度,为医生带  
来新的非侵入性实时诊断工具<sup>[79]</sup>。

表 3 SNSPD 与 InSb 探测器的中红外分子光谱探测系统性能比较<sup>[78]</sup>

Table 3 Performance comparison of mid-infrared molecular spectrum detection system between SNSPD and InSb detector<sup>[78]</sup>

Detector	Response time /ns	<sup>a</sup> NEP /( $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ )	Wavelength range / $\mu\text{m}$	Temperature / K	Detector size / $\mu\text{m}$
WSi SNSPD	<1	0.005	2-7 <sup>b</sup>	0.3	16×16
InSb	>1000	0.7	1-5.5 <sup>c</sup>	77	dia. 1000

<sup>a</sup> compared at 5  $\mu\text{m}$  wavelength, see Fig. 5.

<sup>b</sup> the 7  $\mu\text{m}$  cutoff is limited by the fiber optics; can be extended to longer wavelengths using free-space coupling, and the detection efficiency vs. wavelength curve can be engineered by optical stack designing and optimization;

<sup>c</sup> the 5.5  $\mu\text{m}$  cutoff is limited by the band-gap energy of the InSb semiconductor material.

## 4 结束语

总的来说, SNSPD 的综合性能远高于其他单光子探测器,并且在超远距离单光子成像及单像素相机方面展现出了巨大的应用前景,如卫星测绘、微弱图像成像、红外波段量子遥感等。但是目前基于 SNSPD 的成像雷达相比于其他单光子探测器(PMT, SPAD 等)还是较少的,这主要还是受制于 SNSPD 制冷成本高、数值孔径小、阵列技术不够成熟等因素。目前 SNSPD 研究者们也在致力于优化 SNSPD 器件,希望为未来 SNSPD 的大规模实用化进程铺平道路,其未来发展将主要围绕以下几个方面。

1) 更高性能 SNSPD。尽管 SNSPD 在探测效率、暗计数、时间抖动和计数率方面的优异性能已经得到了实验验证,但是用户始终希望能够获得综合性能更好的 SNSPD,比如要求在探测效率达到 95% 以上的同时,能够获得 1 Hz 以下的暗计数率以及 10 ps 以下的时间抖动等。如何获得综合性能趋近完美的探测器,是未来 SNSPD 发展的一个重要方向。

2) 大光敏面 SNSPD。目前单个 SNSPD 的光敏面直径主要限制在 15~100  $\mu\text{m}$  范围,这很大程度上是受纳米加工技术的限制,如何实现更大面积的均匀纳米线仍是一个技术挑战。更大的光敏面意味着更大的数值孔径,这对于激光通信、成像、荧光探测等应用至关重要。近几年发展的超导微米线技术<sup>[80-81]</sup>,极大地降低了大面积均匀线条的制备难度,为日后实现毫米级甚至是厘米级光敏面尺寸的高性能探测器提供了可能性。

3) SNSPD 阵列。阵列 SNSPD 是未来高灵敏

度单光子成像的解决方案之一。阵列 SNSPD 的制备工艺以及读出方案都是目前研究者们面临的主要技术挑战。虽然目前已经有了一些初步的研究成果,但是 SNSPD 阵列的成品率以及性能仍有极大的提升空间。

4) 更高临界温度的 SNSPD。跟其他超导技术类似,研究者们也一直在努力开发具有更高临界温度的 SNSPD,除了对现有材料的特性进行深入研究,另一方面也在探索包括高温超导材料的新型材料用于 SNSPD 研究。比如 Shibata 等<sup>[82]</sup>发现  $\text{MgB}_2$  SNSPD 可以在 4.2 K 甚至是更高的温度下工作, Ejrnae 等<sup>[83]</sup>在基于高温超导体 YBCO 的 SNSPD( $T_c = 80$  K)上观测到了暗计数,这些都为高温 SNSPD 的实现提供了可能性。

5) 制冷系统。低温制冷技术将在一定程度上决定 SNSPD 的未来发展,制冷系统的体积和价格是该项技术能否大规模应用的一个决定性因素。因此为 SNSPD 设计开发更加紧凑、便携且经济适用的低温制冷系统至关重要。2018 年 1 月,美国 NIST 最先报道了一个基于三级脉冲管加 J-T 节流技术的小型制冷机,然而 J-T 的压缩机尚未成功研制<sup>[84]</sup>;同年 9 月,英国 Glasgow 大学报道了一个基于斯特林+J-T 节流技术的小型制冷机,该制冷机可以满足空间应用需求,但是最低温度只能达到 4.2 K<sup>[85]</sup>;2018 年中国科学院上海微系统与信息技术研究所尤立星团队和中国科学院理化技术研究所梁惊涛团队通力合作,成功研发了可实现空间应用的二级脉冲管+J-T 节流技术小型制冷机,最低无负载工作温度可达到 2.6 K,搭载负载后最低温可到 2.8 K,并且在此温度下在国际上首次实现了 1550 nm 工作波长的 SNSPD 系统探测效率超过 50%<sup>[86]</sup>。这些

研究为小型化 SNSPD 奠定了基础,但是在系统最低温优化、设备紧凑程度以及设备稳定度等方面仍有很长的路要走<sup>[87]</sup>。

### 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] Hamamatsu. Photomultiplier tube(PMT) [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/19326/19322/type.html>.
- [3] Hamamatsu. Photomultiplier tube module [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://www.hamamatsu.com.cn/product/19326/19322/12391/list.html?screen=21792>.
- [4] IDQ. ID100 visible single-photon detector[EB/OL]. [2021-02-01]. <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/products/id100/>
- [5] IDQ. From single components to fully integrated solutions, IDQ offers a wide range of products [EB/OL]. [2021-02-01]. <https://www.idquantique.com/quantum-sensing/products/>
- [6] PHOTEC. Superconducting nanowire single photon detector(SNSPD) [EB/OL]. [2021-02-01]. <https://www.cnphotec.com/productinfo/1435668.html>. 赋同科技. 超导纳米线单光子探测器(SNSPD) [EB/OL]. [2021-02-01]. <https://www.cnphotec.com/productinfo/1435668.html>.
- [7] Lita A E, Miller A J, Nam S W, et al. Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency[J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3032-3040.
- [8] Wang C, Yin Z Q, Wang S, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution robust against environmental disturbances [J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1016-1023.
- [9] Boaron A, Boso G, Rusca D, et al. Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 190502.
- [10] Chen J P, Zhang C, Liu Y, 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.
- [11] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2012.01625>.
- [12] You L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673-2692.
- [13] Inderbitzin K, Engel A, Schilling A, et al. Soft X-ray single-photon detection with superconducting tantalum nitride and niobium nanowires [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 2200505.
- [14] Wollman E E, Verma V B, Beyer A D, et al. UV superconducting nanowire single-photon detectors with high efficiency, low noise, and 4 K operating temperature [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26792-26801.
- [15] Li H, Chen S J, You L X, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3535-3542.
- [16] Marsili F, Bellei F, Najafi F, et al. Efficient single photon detection from 500 nm to 5  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4799-4804.
- [17] Verma V B, Korzh B, Walter A B, et al. Single-photon detection in the mid-infrared up to 10 micron wavelength using tungsten silicide superconducting nanowire detectors[EB/OL]. [2021-02-01]. <http://www.ftracker.net/index.php/Home/Index/content/id/58342585>.
- [18] 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.
- [19] Gol'tsman G, Okunev O, Chulkova G, et al. Fabrication and properties of an ultrafast NbN hot-electron single-photon detector [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11(1): 574-577.
- [20] Semenov A D, Gol'tsman G N, Sobolevski R, et al. Hot-electron effect in superconductors and its application for radiation sensors [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2002, 15(2002): R1-R16.
- [21] Semenov A, Engel A, Hübers H W, et al. Probability of the resistive state formation caused by absorption of a single-photon in current-carrying superconducting nano-strips[EB/OL]. (2004-12-07) [2021-02-01]. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0410633>.
- [22] Vinokur A G A V M. Comment on "vortex-assisted photon count and their magnetic field dependence in single-photon superconducting detectors" [J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 2012, 86: 026501.
- [23] Semenov A D, Haas P, Hübers H W, et al.

- Vortex-based single-photon response in nanostructured superconducting detectors [J]. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 2008, 468 (7/8/9/10): 627-630.
- [24] Zotova A N, Vodolazov D Y. Photon detection by current-carrying superconducting film: a time-dependent Ginzburg-Landau approach [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(2): 024509.
- [25] 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.
- [26] Shibata H, Fukao K, Kirigane N, et al. SNSPD with ultimate low system dark count rate using various cold filters [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4): 1-4.
- [27] Yang X Y, Li H, Zhang W J, et al. Superconducting nanowire single photon detector with on-chip bandpass filter[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 16267-16272.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Huang Y, Wang L, Hu W D, et al. Efficient signal emitters and detectors [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2016, 46(8): 1035-1052.  
黄燕, 王林, 胡伟达, 等. 高效信号辐射源和探测器件[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(8): 1035-1052.
- [31] You L X, Li H, Zhang W J, et al. Superconducting nanowire single-photon detector on dielectric optical films for visible and near infrared wavelengths[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2017, 30(8): 084008.
- [32] Zhou H, Pan Y M, You L X, et al. Superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 60% for 2- $\mu\text{m}$ -wavelength [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-7.
- [33] Wang H Q, Li H, You L X, et al. Fast and high efficiency superconducting nanowire single-photon detector at 630 nm wavelength[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 1868-1872.
- [34] Reddy D V, Nerem R R, Nam S W, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors with 98% system detection efficiency at 1550 nm[J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1649-1653.
- [35] le Jeannic H, Verma V B, Cavallès A, et al. High-efficiency WSi superconducting nanowire single-photon detectors for quantum state engineering in the near infrared [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5341-5344.
- [36] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R B M, et al. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(11): 111301.
- [37] Lanzagorta M. Quantum radar [J]. *Synthesis Lectures on Quantum Computing*, 2011, 3(1): 1-139.
- [38] Karp S, Stotts L B. Fundamentals of electro-optic systems design [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [39] Amann M C, Bosch T M, Lescure M, et al. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40: 10-19.
- [40] Sun Y C, Pang Y J, Bai Z X, et al. Application technology of laser triangulation [J/OL]. *Laser Journal*: 1-10. [2021-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20201104.1145.002.html>.  
孙有春, 庞亚军, 白振旭, 等. 激光三角测量法应用技术[J/OL]. *激光杂志*: 1-10. [2021-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20201104.1145.002.html>.
- [41] Becker W. The bh TCSPC handbook[J]. *Scanning*, 2010, 800: 1-566.
- [42] Warburton R E, McCarthy A, Wallace A M, et al. Subcentimeter depth resolution using a single-photon counting time-of-flight laser ranging system at 1550 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2266-2268.
- [43] McCarthy A, Krichel N J, Gemmell 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.
- [44] Xue L, Li M, Zhang L B, et al. Long-range laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 071201.
- [45] 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.
- [46] Zhu J, Chen Y J, Zhang L B, et al. Demonstration of measuring sea fog with an SNSPD-based lidar system [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 15113.
- [47] Shangguan M J, Xia H Y, Wang C, et al. Dual-frequency Doppler lidar for wind detection with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3541-3544.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Verma V B, Horansky R, Marsili F, et al. A four-pixel single-photon pulse-position array fabricated from WSi superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104 (5): 051115.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W, et al. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89 (11): 113601.
- [57] Valencia A, Scarcelli G, D’Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [58] Zhang D, Zhai Y H, Wu L G, et al. Correlated two-photon imaging with true thermal light [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2354-2356.
- [59] Saldin D. Ghost imaging with X rays [J]. *Physics*, 2016, 9: 103.
- [60] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6065: 606509.
- [61] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25 (2): 83-91.
- [62] Basset M G, Setzpfandt F, Steinlechner F, et al. Perspectives for applications of quantum imaging[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13 (10): 1900097.
- [63] Li J, Pan Y Y, Li J S, et al. Compressive holographic imaging based on single in-line hologram and superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Optics Communications*, 2015, 355: 326-330.
- [64] Gerrits T, Allman S, Lum D J, et al. Progress toward a high-resolution single-photon camera based on superconducting single photon detector arrays and compressive sensing[C]//2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-2.
- [65] 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.
- [66] Dong S, Zhang W, Huang Y D, et al. Long-distance temporal quantum ghost imaging over optical fibers [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26022.
- [67] Yao X, Zhang W, Li H, et al. Long-distance thermal temporal ghost imaging over optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 759-762.
- [68] Yao X, Liu X, You L X, et al. Quantum secure ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(6): 063816.
- [69] Xu J J, Bu L B, Liu J Q, et al. Airborne high-spectral-resolution lidar for atmospheric aerosol detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47 (7): 0710003.
- 徐俊杰, 卜令兵, 刘继桥, 等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶的研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0710003.

- [70] Yang J X, Zhu Y D, Wang Q, et al. Influence of surface reflectance and aerosol optical depth on performance of spaceborne integral path differential absorption lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910001.  
杨巨鑫, 朱亚丹, 王勤, 等. 地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910001.
- [71] Zhang X Y, Jia L, Zhu J, et al. Comparison of laser ranging system based on SNSPD and SPAD detectors [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 378-384.  
张晓英, 贾磊, 朱江, 等. 基于 SNSPD 与 SPAD 探测器的激光测距系统的比较研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(3): 378-384.
- [72] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R B M, et al. Efficient single-photon detection with 7.7 ps time resolution for photon-correlation measurements [J]. ACS Photonics, 2020, 7(7): 1780-1787.
- [73] Chen B L, Yang Z D, Min M, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(19): 190003.  
陈炳龙, 杨忠东, 闵敏, 等. 星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(19): 190003.
- [74] Wang Y, Tang Q, Ma J T, et al. Overview of 2020 precision guided weapons guidance technology development[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021 (1): 31-38.  
王颖, 唐倩, 马菁汀, 等. 2020 年精确制导武器制导技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(1): 31-38.
- [75] Chen L, Schwarzer D, Verma V B, et al. Mid-infrared laser-induced fluorescence with nanosecond time resolution using a superconducting nanowire single-photon detector: new technology for molecular science[J]. Accounts of Chemical Research, 2017, 50(6): 1400-1409.
- [76] Chen L, Lau J A, Schwarzer D, et al. The sommerfeld ground-wave limit for a molecule adsorbed at a surface[J]. Science, 2019, 363(6423): 158-161.
- [77] Lau J A, Chen L, Choudhury A, et al. Transporting and concentrating vibrational energy to promote isomerization [J]. Nature, 2021, 589 ( 7842 ): 391-395.
- [78] Chen L, Schwarzer D, Lau J A, et al. Ultra-sensitive mid-infrared emission spectrometer with sub-ns temporal resolution [J]. Optics Express, 2018, 26 (12): 14859-14868.
- [79] Dam J S, Lichtenberg P T, Pedersen C, et al. Room-temperature mid-infrared single-photon spectral imaging [J]. Nature Photonics, 2012, 6 (11): 788-793.
- [80] Korneeva Y, Vodolazov D, Semenov A, et al. Optical single-photon detection in micrometer-scale NbN bridges[J]. Physical Review Applied, 2018, 9 (6): 064037.
- [81] Charaev I, Morimoto Y, Dane A, et al. Large-area microwire MoSi single-photon detectors at 1550 nm wavelength[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116 (24): 242603.
- [82] Shibata H, Takesue H, Honjo T, et al. Single-photon detection using magnesium diboride superconducting nanowires [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(21): 212504.
- [83] Ejrnaes M, Parlato L, Arpaia R, et al. Observation of dark pulses in 10 nm thick YBCO nanostrips presenting hysteretic current voltage characteristics [J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(12): 12LT02.
- [84] Kotsubo V, Radebaugh R, Hendershott P, et al. Compact 2.2 K cooling system for superconducting nanowire single photon detectors [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27 (4): 1-5.
- [85] Gemmell N R, Hills M, Bradshaw T, et al. A miniaturized 4 K platform for superconducting infrared photon counting detectors [J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30 (11): 11LT01.
- [86] You L X, Quan J, Wang Y, et al. Superconducting nanowire single photon detection system for space applications[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2965-2971.
- [87] You L X. Miniaturizing superconducting nanowire single-photon detection systems [J]. Superconductor Science and Technology, 2018, 31(4): 040503.