

超导纳米线单光子探测现状与展望

尤立星^{1,2,3}

- (1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050;
3. 浙江赋同科技有限公司, 浙江 嘉善 314100)

摘要: 超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是一种量子极限灵敏度的光探测器。它的基本原理是利用光子能量实现超导纳米线库珀对的拆对,从而在超导纳米线局域发生超导-非超导相变。和传统半导体单光子探测器相比,具有探测效率高、暗计数低、时间抖动小、死时间短、宽谱响应以及自由运行等优势。高性能 SNSPD 已经在量子信息、激光通信、激光雷达等领域得到了广泛应用。文中概述了过去几年间国内外在 SNSPD 研发、应用成果及产业化等方面的进展,并对 SNSPD 未来的技术发展和应用进行了展望。

关键词: 单光子探测; 超导纳米线单光子探测; 量子信息; 量子通信

中图分类号: O511⁺.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1202001

Status and prospect of superconducting nanowire single photon detection

You Lixing^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Center for Excellence in Superconducting Electronics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Zhejiang Photon Technology Co., Ltd., Jiashan 314100, China)

Abstract: Superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) is an optical detector with quantum-limit sensitivity. The detection mechanism is based on the Cooper-pair breaking by the photon energy, which results in a phase transition from superconducting state to non-superconducting state. SNSPDs surpass the semiconducting counterparts with high detection efficiency, low dark count rate, small timing jitter, short dead time, broad spectrum sensitivity as well as free-running etc. SNSPDs with high performance have been applied in various fields, such as, quantum information, laser communication, light detection and ranging. The progress of SNSPD research and development, application as well as commercialization at home and abroad in the past few years was summarized. An outlook of SNSPDs' R&D as well as applications was also provided.

Key words: single photon detection; superconducting nanowire single photon detection; quantum information; quantum communication

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-10-21

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2017YFA0304000); 国家自然科学基金(61671438)

作者简介: 尤立星(1976-), 男, 研究员, 中国电子学会会士, 主要从事超导电子学方面的研究。Email: lxyou@mail.sim.ac.cn

0 引言

超导是在特定温度下呈现零电阻的一类特殊材料, 超导电子学是利用超导材料开展电子学相关研究的一个专门学科。利用超导材料制备的传感器、探测器及电路通常具备高灵敏度、低噪声、高速度等优势, 使得其在很多领域发挥着不可替代的优势。

超导纳米线单光子探测器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)¹ 是 2001 年俄罗斯人 Goltsman 发明的一种新型的单光子探测器。该探测器的典型结构是超薄低温超导材料(比如 NbN)制备的纳米线。工作时, 给纳米线一个偏置电流, 其大小非常接近, 但是略小于纳米线的超导临界电流。当一个光子被超导纳米线吸收后, 由于光子的能量(典型可见/近红外波段光子能量约 1 eV)比超导材料的超导能隙(NbN 薄膜材料约 3 meV)大 2~3 个数量级, 一个光子就可以拆散数百个库伯对, 从而在纳米线上形成一个非超导的热点区域。该热点区域的出现会导致纳米线上的局域电流密度超过其可以承载的临界电流密度, 从而出现一个横跨整个纳米线的有阻区。该有阻区的能量会通过电-声子作用弛豫到衬底中, 从而恢复初始的超导态。这个超导态-有阻态-超导态的动态过程在电路上体现为在纳米线两端产生一个电压脉冲, 其典型幅值约 1 mV。通过对这个电压脉冲的甄别就可以实现单光子探测。因此, SNSPD 是一个典型的具有量子极限灵敏度的超导探测器²。

经过十几年的发展, SNSPD 的主要性能指标(探测效率、暗计数、时间抖动、计数率/死时间等)都得到了大幅提升。高性能的 SNSPD 器件已经在量子密钥分发、光量子计算、激光通信、激光雷达等众多领域得到了大量应用验证。相关应用需求也催生了 SNSPD 的产业化, 全球范围内已有六家小型高科技公司开展相关的 SNSPD 的商业化运作。国际电工委

员会(IEC)和中国超导国家标准化委员会正在启动 SNSPD 的标准化工作。

国内外 SNSPD 的研发还在持续推进, 相信随着性能的进一步提升及商业化的推进, SNSPD 的应用领域会进一步拓展。文中结合了中国科学院上海微系统与信息技术研究所/中国科学院超导电子学卓越创新中心的工作, 介绍了过去几年 SNSPD 领域的主要发展动态, 包括器件与系统研发、应用及产业化工作。同时, 对该领域未来的发展提出了个人的观点和展望。

1 SNSPD 研究进展

SNSPD 性能的快速提升得益于对 SNSPD 探测机理理解的不断深入, 此外, 光学、电子学及低温等先进配套技术的采用也充分保障了 SNSPD 性能的发挥。该节将围绕 SNSPD 的不同性能指标和技术进展进行分别介绍。

1.1 探测效率

SNSPD 的探测效率由光耦合效率、光学吸收效率和本征探测效率三个因素共同决定。同时优化上述三个因素, 可以实现探测效率的最大化。最近几年, 通过发展各种不同高吸收效率的光学结构, 比如介质镜面结构、双层腔体结构等, 使得 SNSPD 的光学吸收效率接近 100%。2013 年, 美国国家标准与技术研究所利用 WSi 材料首次实现了 1 550 nm 波长 SNSPD 探测效率达到 93%^[1]; 2017 年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所首次利用 NbN 材料实现了 1 550 nm 波长 SNSPD 探测效率超过 90%^[2]。上述结果仍保持目前 WSi 和 NbN 两类主流材料 SNSPD 探测效率的最高纪录。需要指出的是, 上述数值均为系统探测效率, 任何系统层面光路的损失都会计入实测系统探测效率。比如光纤接头 0.1 dB 的损耗会造成系统效率降低 2.3%。理论上系统探测效率仍可以进一步提升, 甚至达到或接近 100%。这

1. 国际电工委员会(IEC)于 2017 年发布了国际标准 IEC 61788-22-1, Superconductivity-Part 22-1: Superconducting electronic devices- Generic specification for sensors and Detectors。在该标准中, 考虑到 SNSPD 的几何结构是一个纳米条带 (nanostrip), 而非纳米线 (nanowire), 因此将此类探测器命名为“superconducting nanostrip photon detector (SNSPD)”。文中使用研究人员普遍采用的命名。
2. 除了 SNSPD 以外, 还有其他几种可实现单光子探测的超导器件, 比如超导相变边缘探测器(TES)、超导隧道结(STJ)、超导动态电感探测器(KID)等。但是它们的综合性能和实用性与 SNSPD 相比都有明显的差距, 限于篇幅, 这里不一一介绍。

需要在器件和系统层面近乎极致的优化工作。

1.2 暗计数

SNSPD 的暗计数主要包括两部分:一部分是探测器自身的本征暗计数;另一部分是背景暗计数,来源于 SNSPD 系统的黑体辐射和外界的杂散光。本征暗计数通常随着偏置电流呈指数线性上升关系,只在偏置电流非常接近于临界电流时才非常明显。尽管原理还不是完全清晰,但是一般认为和特定温度下的超导材料的涡旋行为有关。背景暗计数主要和系统中被 SNSPD 探测到的环境热辐射光子有关。对于一个光纤耦合的无外界信号光和杂散光进入的 SNSPD 系统,其背景暗计数主要由和与 SNSPD 相连的光纤在室温端的遮光用盲头的热辐射所贡献。因此,背景暗计数率和探测效率呈正比。在实际应用中,适当降低偏置电流,这时本征暗计数的贡献就可以忽略,起主要贡献的就是背景暗计数。由于热辐射呈宽谱特性,可以通过低温滤波的方法,在保证信号光子被 SNSPD 吸收的同时,滤除绝大多数背景暗计数,从而大幅提高 SNSPD 器件的信噪比。在滤波前,典型 SNSPD 的暗计数可以控制在 10~100 Hz;光学滤波后,暗计数可以减小到 1 Hz 以下^[3-5]。

1.3 死时间/速度

死时间反映了 SNSPD 在时域上响应光子的能力。从电学角度, SNSPD 的光子响应对应 SNSPD 上的电流快速减小到一定值,然后逐渐恢复的过程。这个时间的理论极限是 SNSPD 器件的热弛豫时间;实际器件死时间主要由器件的动态电感所决定。由于器件为纳米线结构,随着光敏面的增大,器件纳米线线长增加,其动态电感为几十到几百纳亨甚至更大。典型器件的死时间在几个纳秒到几十个纳秒不等;器件的计数率为几兆到几十兆不等。通过优化器件的动态电感和读出电路可以实现器件速度的进一步提升。

1.4 时间抖动

单光子响应电脉冲信号在时域上的不确定性体现为时间抖动。一方面,时间抖动和待测 SNSPD 器件时间抖动有关,也和测试系统各个部分时间抖动有关。测量到的时间抖动体现为所有部件的时间抖动的均方根。从器件角度,时间抖动与被探测信号的信噪比有关,信噪比越大,时间抖动越小。一个实用化的 SNSPD 器件,其最优信噪比可以做到 20 ps 以

下^[6]。实验研究表明,时间抖动还和光子在 SNSPD 纳米线不同位置被吸收所引起的电信号传输延时不同有关。已有实验测量到短纳米线的时间抖动可以达到 3 ps^[7]。

1.5 宽谱响应

基于光子触发库珀对的拆对机制,通过不同超导材料的选择以及结构和几何参数的优化, SNSPD 可具有很宽的光谱响应范围,实现宽谱单光子探测。它能够探测从 X-ray 到中远红外的光子,并且具有极高的时间精度和信噪比^[8-11]。目前已开始有相关工作报道,这有望让 SNSPD 的应用走向更广阔的科学应用领域,这也是 SNSPD 优于其他类型单光子探测器的显著特征。

除了上述主要的指标以外, SNSPD 在阵列读出技术、光子数分辨能力、片上波导耦合器件等方面在过去几年内都有很大的进展。相信其性能还有很大的提升空间。

2 SNSPD 应用

高性能 SNSPD 的出现使得很多创新性实验成为可能,有力推动了量子信息、空间通信、激光雷达、光谱检测、光纤传感等领域的实验科学发展。相关应用验证的实验成果很多,无法一一列举。下面就几个关键的应用做简单介绍。

2.1 量子信息

量子信息技术是过去 20 年最重要的学术前沿领域之一,它也是 SNSPD 技术快速发展的最重要的需求牵引。从 2005 年美国 NIST 首次将 SNSPD 应用到量子通信以来, SNSPD 已经成为光纤量子通信试验技术快速发展的主推手之一。中国科学技术大学潘建伟院士团队利用中国科学院上海微系统与信息技术研究所研发的高性能 SNSPD 器件在过去几年内创造了多项光纤量子密钥分发的世界纪录,目前仍保持 404 km 光纤量子密钥分发最远距离的世界纪录^[12-14];该团队还利用高效率 SNSPD 器件实现了量子隐形传态、大贝尔实验、量子随机数发生器、量子指纹等系列量子信息领域重要实验进展^[15-18]。此外,高性能 SNSPD 器件还成功应用到泊松采样等光量子计算/模拟实验^[19-20]中。高性能 SNSPD 为我国在量子信息领域的国际领先地位提供了核心的探测器

技术支持。

2.2 深空激光通信

空间科学对空间通信技术的要求越来越高,特别是火星探测等未来空间科学计划对空间通信速度提出更高的要求,传统的微波通信已无法满足其要求。光通信被认为是未来深空通信的首选技术。和微波通信相比,光通信具有体积小、功耗低、带宽大(高速)等优势。然而,空间光通信对探测器的性能提出了极高的要求。2013 年美国 NASA 首次实现了绕月轨道卫星和地球之间的直接光通信(LLCD 项目)。利用在地面基站的高速 SNSPD 阵列,实现了卫星对地 622 Mbps 的直接激光通信,被誉为空间光通信的里程碑。目前美国正在开展下一代技术研制项目(TDM),计划在 2021 年利用新一代 SNSPD 阵列实现火星到地球(2.6 个天文单位)的 45 kbps 的激光通信^[21-22]。

2.3 激光雷达

激光雷达(Light detection and ranging, LIDAR)是基于光子飞行时间(Time of flight, TOF)的一种距离测量技术。依赖该技术可以实现卫星和空间碎片轨道监测、大气和风速检测等应用。其探测精度和探测系统的时间抖动有关。和传统半导体单光子探测器相比,SNSPD 在激光雷达应用方面也体现出了明显的优势。中国科学院上海微系统与信息技术研究所、南京大学及中国科学技术大学等在该领域都做出了国际领先的成果。比如在 532 nm 波长的 3 000 km 卫星激光测距^[23]、1 064 nm 波长的 20 000 km 卫星测距^[24]、海雾测量^[25]以及风速测量^[26]等。

3 SNSPD 研发与产业化

SNSPD 的独特性能和应用潜力受到了国内外研究学者的广泛关注。国外的主要研究机构有美国的麻省理工学院(MIT)、国家标准与技术研究所(NIST)、喷气动力实验室(JPL);日本的国立情报与通信研究机构(NICT);俄罗斯的莫斯科师范大学;荷兰的 Delft 技术大学以及英国的 Glasgow 大学等。国内研究单位包括中国科学院上海微系统与信息技术研究所、南京大学、天津大学和清华大学等。从研发水平上看,中国在该领域的研究水平整体处于国际一流行列,器件性能和部分应用成果已达到国际领先水平。

高性能的 SNSPD 受到了量子信息等领域的极大关注,应用需求在快速增加。在此背景下,SNSPD 的产业化也出现了很好的发展态势。目前全球已经出现 6 家以 SNSPD 为主打产品的小型高科技公司。包括 Photon Spot(美国)、Quantum Opus(美国)、Scontel(俄罗斯)、Single Quantum(荷兰)、ID Quantique(瑞士)以及赋同科技(中国)。

赋同科技^[27]是中国唯一一家开展 SNSPD 商业化运作的公司,已为中国科学技术大学、清华大学等逾 15 家用户提供了 20 余台 SNSPD 系统,国内的市场占有率达到 50% 以上。特别值得一提的是,由于国内外在 SNSPD 领域的发展水平接近,6 家公司的产品性能也都处于同一水平。在技术支持和售后服务层面,赋同科技要远远强于其他国际同行。

4 SNSPD 发展展望

SNSPD 仍处于蓬勃发展的阶段,随着科研人员的深入研究,其性能潜力还会被进一步发掘。同时,随着产业化的推广,SNSPD 的技术成熟度也会逐渐提升,其应用领域也有望进一步扩大。笔者从科学与技术角度给出如下发展展望。

(1) SNSPD 的单项指标还会进一步提升,比如 1 550 nm 工作波长探测效率有望提升至 95% 以上。此外,其综合性能好的器件会成为新的研发目标,即高效率、低暗计数、高速度和低时间抖动等指标有望同时实现。随着 SNSPD 工艺的成熟,其产率会进一步提高,芯片的成本也会有很大的下降空间;此外,一些新功能器件也会陆续出现,比如宽谱器件、中红外长波、光子数分辨 SNSPD 器件等;集成 SNSPD 的片上量子信息系统也会是一个很有意义的研究方向。

(2) 激光通信等应用需求会带动 SNSPD 阵列技术的发展,未来有望实现基于 SNSPD 的图像传感器。美国和日本已经在该领域有不少工作开展。相信我国在空间激光通信需求的牵引下,相关工作也会快速跟上国际步伐。

(3) SNSPD 低温和电子学配套技术会得到快速发展。包括地面和空间用小型制冷机、超导 SFQ/半导体(阵列)电路技术、低温恒温器等。而这些技术的发展对于 SNSPD 的产业化也至关重要。

2017~2018 年,中国、美国、日本、欧盟以及英国

政府都陆续公布了各自的量子科技研发战略。我国的量子国家实验室已在筹建中,量子国家重大专项有望很快依托于量子国家实验室进行实施。这为我国及全球的 SNSPD 技术发展带来了前所未有的重大发展机遇。相信 SNSPD 技术还会得到进一步的发展,带动超导电子学、低温电子学和低温光电子学等学科建立和发展,并推动量子信息科技的进步。

参考文献:

- [1] Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(3): 210–214.
- [2] Zhang W, You L, Li H, et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1 550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(12): 120314.
- [3] Zhang W J, Yang X Y, Li H, et al. Fiber-coupled superconducting nanowire single-photon detectors integrated with a bandpass filter on the fiber end-face [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(3): 035012.
- [4] 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.
- [5] Konstantin S, Yury V, Alexander D, et al. Dependence of dark count rates in superconducting single photon detectors on the filtering effect of standard single mode optical fibers [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(2): 022501.
- [6] Esmail Zadeh I, 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.
- [7] Korzh B, Zhao Q, Frasca S, et al. Demonstrating sub-3 ps temporal resolution in a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *arXiv Preprint arXiv*, 2018, 1804: 06839.
- [8] Inderbitzin K, Engel A, Schilling A, et al. An ultra-fast superconducting Nb nanowire single-photon detector for soft x-rays[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 162601.
- [9] Marsili F, Bellei F, Najafi F, et al. Efficient single photon detection from 500 nm to 5 μm wavelength[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4799–4804.
- [10] Wang Y, Li H, You L, et al. Broadband near-infrared superconducting nanowire single-photon detector with efficiency over 50% [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(4): 2200904.
- [11] 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.
- [12] Yin H L, Chen T Y, Yu Z W, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over a 404 km optical fiber[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(19): 190501.
- [13] Tang Y L, Yin H L, Zhao Q, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over untrustful metropolitan network [J]. *Physical Review X*, 2016, 6(1): 011024.
- [14] Tang Y L, Yin H L, Chen S J, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution over 200 km [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(19): 190501.
- [15] Abellán C, Acín A, Alarcón A, et al. Challenging local realism with human choices [J]. *Nature*, 2018, 557(7704): 212–216.
- [16] Sun Q C, Mao Y L, Chen S J, et al. Quantum teleportation with independent sources and prior entanglement distribution over a network[J]. *Nat Photon*, 2016, 10(10): 671–675.
- [17] Liu Y, Yuan X, Li M H, et al. High-speed device-independent quantum random number generation without a detection loophole [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(1): 010503.
- [18] Guan J Y, Xu F, Yin H L, et al. Observation of quantum fingerprinting beating the classical limit [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 240502.
- [19] Wang H, Li W, Jiang X, et al. Toward scalable boson sampling with photon loss[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(23): 230502.
- [20] He Y, Ding X, Su Z E, et al. Time-bin-encoded boson sampling with a single-photon device [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(19): 190501.
- [21] Cornwell D M. NASA's optical communications program for 2015 and beyond[C]//SPIE, 2015, 9354: 93540E.
- [22] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, et al. An optical receiver for the Lunar Laser Communication Demonstration based on photon-counting superconducting nanowires [C]//SPIE, 2015, 9492: 949208.
- [23] Li H, Chen S, You L, et al. Superconducting nanowire single photon detector at 532 nm and demonstration in satellite laser ranging[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3535–3542.

- [24] Xue L, Li Z, Zhang L, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1 064 nm wavelength[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3848–3851.
- [25] Zhu J, Chen Y, Zhang L, et al. Demonstration of measuring sea fog with an SNSPD-based lidar system [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 15113.
- [26] Shangguan M, Xia H, 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.
- [27] 赋同科技. SNSPD 系统 [EB/OL]. [2018-10-21]. <http://www.sconphoton.com/>.