

光量子信息利器——超导纳米线单光子探测器*

尤立星^{1,2,†}

(1 赋同量子科技(浙江)有限公司 嘉兴 314100)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 超导电子实验室 上海 200050)

2021-08-13收到

† email: lxyou@mail.sim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20211004

A powerful tool for quantum information —— superconducting nanowire single-photon detectors

YOU Li-Xing^{1,2,†}

(1 Photon Technology (Zhejiang) Co. Ltd., Jiaxing 314100, China)

(2 Division of Superconducting Electronics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

摘要 利用超导宏观量子效应与环境电磁场的相互作用, 超导探测器可以实现量子极限灵敏度探测。超导纳米线单光子探测器(SNSPD)具备高探测效率、低暗计数等优异的性能, 已经在量子信息、深空通信、激光雷达等领域得到了广泛的应用, 并为中国“九章”光量子计算原型机、量子密钥分发等领域达到国际领先水平提供了核心探测技术支持。文章简述了SNSPD的基本原理, 对其性能、制冷技术、应用以及常见的问题等进行了介绍, 并对未来发展做了展望。

关键词 单光子探测, 探测效率, 量子信息

Abstract Based on the interaction between superconducting macroscopic quantum effects and environmental electromagnetic field, superconducting detectors can provide ultrasensitive detection with quantum-limit sensitivity. Superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs), with their outstanding features such as high detection efficiency and low dark count rate, have been widely applied in various fields including quantum information, deep space communication, and lidar. As the key detectors in the prototype optical quantum computer “Jiuzhang” and quantum key distribution systems, they also played a major role in bringing China to the forefront of quantum information research. In this paper, I introduce the basic mechanism of the SNSPD and discuss its key metrics, related cryogenics, applications, and frequently asked questions. A preview of future developments is also given.

Keywords single photon detection, detection efficiency, quantum information

* 科技部重点研发计划(批准号: 2017YFA0304000)、上海市市级科技重大专项(批准号: 2019SHZDZX01)、中科院前沿科学重点研究计划(批准号: QYZDB-SSW-JSC013)、浙江省级重点研发计划(批准号: 2021C01188)和嘉兴市领军型创新创业团队资助项目

1 引言

2020年12月4日, *Science* 在线发表了中国科学技术大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所和国家并行计算机工程技术研究中心的合作成果: 76个光子的量子计算原型机“九章”, 实现了“高斯玻色取样”任务的快速求解。这一成果使得中国成功达到了量子计算研究的第一个里程碑: 量子计算优越性(国外也称为“量子霸权”), 并入选了“两院院士评选的2020年十大科技进展新闻”^[1]。“九章”的成功可以说是众多技术的集大成者, 其中一项核心的技术就是超导纳米线单光子探测(superconducting nanowire single photon detector, SNSPD)技术。“九章”共使用了100个平均系统探测效率为0.81的高性能SNSPDs。2021年7月1日, “九章2.0”在线公布了预印本^[2], 光子数从1.0版本的76个提升至2.0版本的113个, 这也是所有物理体系中量子信息处理单位数量首次突破100个。而其中SNSPD的数目也从100个提升至144个, 平均系统探测效率提升至0.83。

其实, 除“九章”以外, SNSPD在量子信息等众多领域都已经大显身手, 有力推动了量子信息等领域的科技进步^[3]。比如, SNSPD多次应用于量子密钥分发, 多次创造并长期保持了光纤量子密钥分发距离纪录^[4, 5]; 成功实现量子随机数发生器^[6]、量子力学非定域性验证^[7]、深空通信^[8]、激光雷达^[9]和表面化学^[10]等应用。

本文将介绍SNSPD的研究背景、基本特性和相关应用, 并就一些大家通常比较关注的问题进行简单的探讨。

2 发展历程

过去几十年, 随着对量子世界认识的不断加深以及实验技术的进步, 人类对微观体系的量子态检测与调控能力逐渐增强, 量子信息技术也逐渐走上台前, 并被称为“第二次量子革命”。光是电磁波谱中人类了解最为全面的波段, 光子也是

最易产生、操控、传输及探测的量子态载体之一, 因此, 光量子信息技术也在量子信息技术中扮演着重要的角色。光量子信息中量子比特的载体是单个光子。因此, 单光子探测器(single photon detector, SPD)就成为光量子信息技术中的核心器件。

由于信息技术对器件性能要求极高, 传统的光电倍增管、半导体雪崩光电二极管等SPD已难以完全满足光量子信息技术的需求。在此背景下, SNSPD的出现可谓是恰逢其时。实际上, 基于超导材料的SPD除了SNSPD以外, 超导转变边沿探测器和超导隧道结探测器也可以用于单光子探测, 但是受到其性能、工作条件及成本等制约无法实现规模化应用。

2001年, 俄罗斯Gol'tsman团队首次报道了利用200 nm宽、5 nm厚超导氮化铌(NbN)薄膜纳米线实现810 nm波长单光子探测的实验结果, 拉开了SNSPD发展的序幕^[11]。2006年, 美国NIST首次将SNSPD应用于量子密钥分发, 显示其在量子信息领域的巨大应用潜力, 可以说是给SNSPD的发展提供了强大的助推力^[12]。如今, 美国、日本、荷兰、德国、俄罗斯和中国等数十个国家的几十个研究团队都在积极开展相关的研究工作, 在不断增强对SNSPD机理理解的同时, 推动了SNSPD技术的飞速发展。在量子信息等领域的应用需求驱动下, 全球已出现多家小型高科技公司, 实现了SNSPD的小规模产业化, 并推动了它的广泛应用。SNSPD可以说是超导电子学领域迄今为止发展最为成功的一类超导探测器。今年恰逢SNSPD诞生20周年, 回顾这段历史具有特别的意义。

3 基本原理

超导材料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、探测器通常具备高灵敏度、低噪声、高速度等优势, 可以在很多领域发挥不可替代的作用。

对于 SNSPD 来说，要简单地阐述其基本原理，我们只需要理解两点即可。

(1) 超导 BCS 理论告诉我们，超导的形成是在特定温度(超导临界温度)以下，材料中的两个电子通过电声子相互作用而发生耦合配对，形成超导库珀对，库珀对可以在材料中实现无阻的运动。库珀对具有一定的结合能(超导能隙)，如果库珀对吸收的能量大于该结合能，库珀对就会被拆散而形成准粒子，最终破坏超导态，呈现电阻态。对于典型的低温超导材料 NbN 来说，库珀对的能量约为 6.4 meV。而光子的典型能量在 1 eV 左右，比如光纤通信的 1550 nm 波长对应的光子能量为 0.8 eV。简单地估算，如果一个光子被超导材料吸收之后，它的能量就可能破坏数百个超导库珀对，从而在超导材料中形成一个局域的有电阻的热点(hot spot)。也可以说超导材料吸收光子后发生了微观局域超导态到有阻态的相变。对于 SNSPD 来说，这个典型的热点大小在几十纳米。

(2) 要实现单光子探测，就需要将上述的微观相变转换为一个可以测量的物理量。对于一片宏观的超导薄膜材料来说，吸收一个光子发生的变化，相当于在太平洋中投入一个石头。石头再大，其对海洋的影响也几乎可以忽略。如果我们将海洋换成一条河流，投入的石头不需要太大，就会对河水的流动产生明显的影响，甚至能够造成河流的阻塞。SNSPD 的纳米线结构就是类似的原理。首先将超导薄膜材料加工成一条纳米线，

线宽要和热点的尺寸可以比拟；其次要保证纳米线足够薄，一方面可以保证热点的薄膜面内尺寸足够大，另外一方面吸收光子之后纳米线产生的热量能够快速通过衬底扩散掉，确保器件能够继续工作，实现可持续的光子探测。

基于以上两点构造的 SNSPD 器件工作原理如图 1 所示。为了有效地增强纳米线对入射光子的吸收能力，人们通常将纳米线加工成曲折线结构，形成特定尺寸的光敏面(图 1(c)插图)。图 1(a)详细图解了 SNSPD 的工作原理。给超导纳米线施加一个偏置电流(a-i)，该电流接近但稍小于纳米线的临界电流。纳米线吸收光子之后，会产生一个热点(a-ii)，这使得热点周围的电流密度超过纳米线能够承载的临界电流密度，周围的超导态就会被破坏，使得热点长大(a-iii)，导致一个横跨整个纳米线的有阻区出现(a-iv)。从而将纳米线上的电流排斥到纳米线的读出电路中(图 1(b))。这个有阻区在电流动态变化和焦耳热通过衬底弛豫的电热动态反馈的互作用下，呈现先长大再减小(a-v & a-vi)，最终恢复超导态的过程(a-i)。整个过程的结果就是在纳米线两端出现一个电压脉冲，该脉冲呈现上升沿很快，下降沿较慢的过程(图 1(c))，脉冲宽度主要由纳米线的动态电感决定，器件光敏面越大，线条越长，动态电感也就越大，典型的响应脉宽在几个纳秒到几十个纳秒之间。

需要说明的是，典型的 SNSPD 是一个开关型器件，它具备单光子探测能力，但是其响应波形并不对光子能量或者光子数具有明显的分辨能力。

因为响应波形的特性主要由 SNSPD 的材料、偏置电流和动态电感等参数确定。就像我们日常用的电开关一样，它可以让灯点亮，但是给灯供电的并不是开关，而是电网。

和其他超导探测器相比，SNSPD 能够迅速实现规模化应用有几点原因：(1) 工艺和结构非常简单：仅需单层超导薄膜，且超导薄膜加工需要单层工艺即可实现；(2) 读出电路简单：典型光子

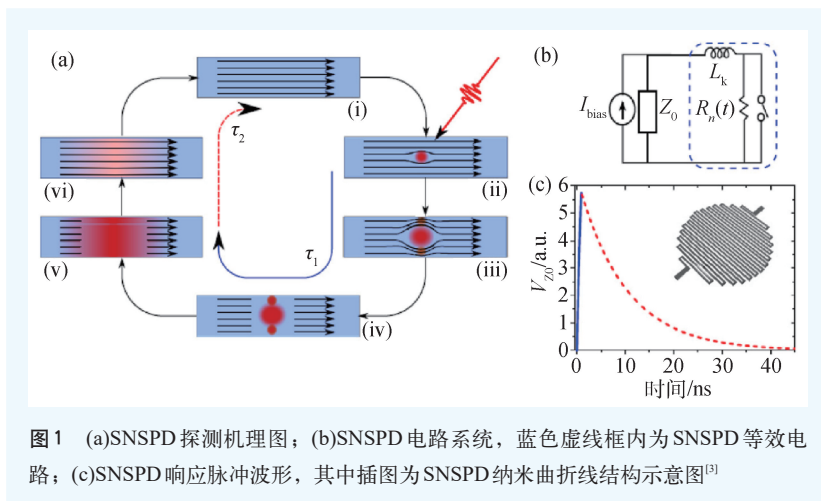


图 1 (a) SNSPD 探测机理图；(b) SNSPD 电路系统，蓝色虚线框内为 SNSPD 等效电路；(c) SNSPD 响应脉冲波形，其中插图 of SNSPD 纳米曲折线结构示意图^[1]

响应的脉冲原始信号幅度在亚毫伏量级，仅需要使用室温低噪声放大器即可获得较高信噪比的信号；(3)鲁棒性强：作为一个光电探测器，实现了光子到电脉冲的转换，可以说是光数字信号到电数字信号的转换，抗环境噪声能力强。同时它和超导约瑟夫森结型器件的不同之处在于，SNSPD对环境磁场不敏感，且器件电阻通常在 $M\Omega$ 量级，抗静电及环境干扰能力强；(4)通常SNSPD采用NbN等低温超导材料制备，仅用液氦温区两级小型制冷机即可实现，系统可靠性强，可7×24小时不间断运行。即使从最保守的角度来看，SNSPD也可以作为一个高性能的高端科研装备，满足众多研发领域对高性能SPD的需求。

4 性能参数

作为一个单光子探测器，SNSPD的评价指标主要包括探测效率、暗计数率、速度(死时间)和时间抖动等。此外，响应波长、光敏面尺寸、带宽、光子数分辨能力、阵列数、饱和计数率也是一些应用中经常需要考虑的性能参数。

探测效率是SNSPD的最核心指标。从应用的角度来看，SNSPD系统探测效率由光耦合效率、吸收效率和本征探测效率三个因素的乘积决定。成熟的光学技术(光学薄膜、透镜光学、光学仿真计算等)和超导薄膜及微纳加工技术，使得以上三个因素都能够做到近乎理想。2020年末，中国科学院上海微系统与信息技术研究所、美国NIST、荷兰TU Delft三个团队都先后报道了系统探测效率超过98%的SNSPD(图2)^[13-15]，这意味着SNSPD的系统探测效率已经接近了100%的极限。但是如何能够满足应用需求，进一步发展和优化光学和超导薄膜及加工技术，实现科研实验少量使用到产业化批量供货能力的提升，还有很多细节的研发工作需要继续开展。

暗计数率是代表SNSPD噪声水平的指标。作为一个探测器，不仅信号响应能力(探测效率)要足够高，噪声也要足够低。SNSPD是一个光量子极限灵敏度的探测器，对黑体辐射光子都有探测能力，这种黑体辐射甚至可以来源于与探测器相

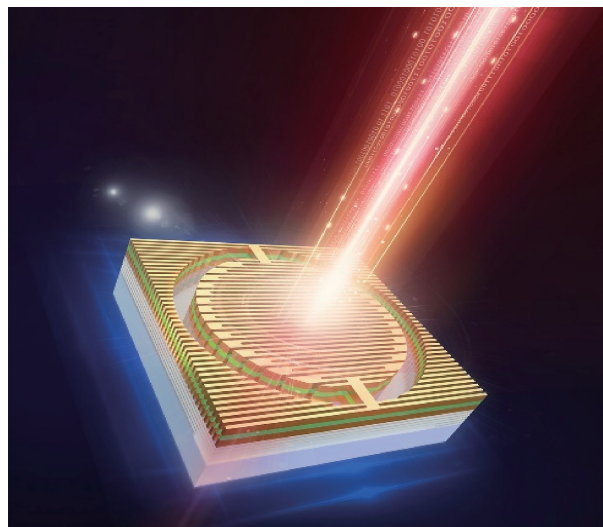


图2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所研发的基于双层纳米线的SNSPD示意图，其最高探测效率达98%

连的光纤本身。黑体辐射响应计数就构成了SNSPD的背景暗计数，一般单模光纤耦合的SNSPD的背景暗计数在几十到数百cps(每秒计数)范围。由于黑体辐射具有宽谱特性，只需要在接近探测器的深低温端引入带通滤波器，就可以滤掉绝大多数的背景暗计数，实现1 cps甚至更低的暗计数率^[16]。除了背景暗计数以外，探测器在偏置电流非常接近于临界电流时，会产生超导纳米线自发的涡旋运动引起的本征暗计数，本征暗计数和偏置电流呈指数线性上升关系，会远高于背景暗计数。但是对于应用来说，只要适当降低偏置电流，就可以在保证系统高探测效率的同时有效避免本征暗计数的影响。

SNSPD的速度(死时间)对于通信和计算等应用非常关键。探测器产生一个光子响应后会存在一个恢复时间。在此时间内，器件上的电流呈现先快速减小后逐渐增加的过程，因此其探测能力也是逐渐恢复的，恢复时间主要由器件的动态电感(正比于纳米线的长度)决定。器件的死时间或者速度的简单估算可以通过光子响应脉冲的宽度来计算。一般SNSPD的速度在几兆到几十兆赫兹范围之内。如果想要提升SNSPD的速度，最简单的方法就是减小纳米线的长度。或者将一根纳米线分成多根纳米线，这样既能保障有效的光敏面尺寸，同时可以提升器件的速度^[17]。

时间抖动表征的是探测器光子响应在时域上的不确定性，它直接决定了基于飞行时间的激光雷达的测距精度。时间抖动与探测系统的电子学、响应信号信噪比、器件的几何尺寸等因素有关。尽管实验研究显示超导纳米桥的本征时间抖动可以优于 $3 \text{ ps}^{[18]}$ ，对于一个实用的 SNSPD 器件来说，最优抖动一般可以做到 20 ps 以下。

5 制冷技术

SNSPD 最核心的支撑技术是制冷技术。对于 NbN 和 NbTiN 等材料的 SNSPD 来说，一般工作温度在 2 K 以上，采用商用的小型 G-M 二级制冷

机就可以实现，主要产品提供商包括日本住友和南京鹏力超低温等。对于 WSi 和 MoSi 等材料的 SNSPD，可以在上述二级制冷机基础上增加一级吸附制冷，从而实现最低温度达到 1 K 以下的制冷机。尽管上述制冷机技术已经为 SNSPD 产品化提供了核心支持，但是其成本和可靠性也是 SNSPD 系统性能的主要制约因素，一定程度上也是 SNSPD 规模化应用的主要瓶颈。

值得一提的是，中国科学院理化技术研究所面向空间应用的 2 K 温区小型制冷机研发已经取得突破。中国科学院上海微系统与信息技术研究所利用该制冷机实现了 SNSPD 系统探测效率超过 90% ，达到了国际领先水平，为 SNSPD 的空间

超导纳米线单光子探测器小知识

1 高温超导 SNSPD 可行吗？

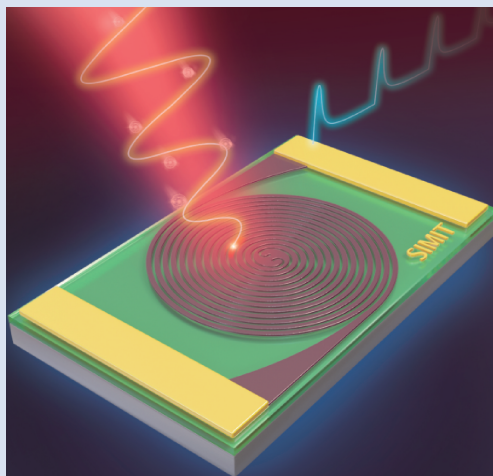
这是一个大家普遍关心的问题。超导材料的能隙电压和临界温度成正比，这意味着高温超导库珀对的能量比低温超导材料库珀对能量大数倍以上。因此，从探测机理上来讲，光子对高温超导库珀对拆对能力会弱很多，因此会明显影响 SNSPD 的探测效率。如果高温超导 SNSPD 性能相对于非超导 SPD 不能存在压倒性优势，其应用可能性极低。此外，高温超导材料通常是多元组分，结构复杂，高温超导超薄薄膜的稳定性、纳米尺度的均匀性和纳米线加工的一致性都存在着巨大的挑战。因此到目前为止，只有少量利用高温超导材料(YBCO 和 MgB_2 等)制备 SNSPD 的探索性尝试，尚无具备可靠性能的高温超导 SNSPD 报道。

2 一定要纳米线吗？

SNSPD 加工工艺最大的挑战来源于高度均匀的纳米线加工，其典型的厚度:宽度:长度比达到 $1:20:200000$ 。实现纳米线的主要技术手段是电子束曝光，这也成为大面积 SNSPD 制备的主要技术制约。能否实现高性能的更大线宽的 SNSPD(微米线是否可行?)，是 SNSPD 研究的重要议题。2017 年俄罗斯科学家的理论研究工作表明，如果能够让 SNSPD 的临界电流接近于其拆对电流(de-pairing current)，即使是微米线，也可以实现高的本征探测效率^[21]。2021 年，中国科学院上海微系统与信息技术研究所率先报道了结合双螺旋结构和离子注入技术的超导微米带单光子探测器(superconducting microstrip single photon detector, 右图)，其系统探测效率达到了 90% 以上^[22]。这也揭示进一步发展基于光学曝光技术，制备更大光敏面超导单光子探测器的可行性。

3 关于 SNSPD 的命名

需要补充说明的是关于该类器件的命名，尽管学界普遍使用超导纳米线单光子探测器(superconducting nanowire single photon detector)这个名字，但是由于其厚度和宽度比一般达到 $1:20$ 甚至更大，并不是严格意义上的纳米线，更像一个纳米带。因此在国际标准(IEC 61788-22-1)中，该类器件被命名为 superconducting strip photon detector^[23]。显然，该名字也适用于上述的微米带结构。



螺旋结构超导微米带单光子探测器结构图

应用铺平了道路^[19]。

6 应用与产业化

SNSPD的快速发展与量子信息等领域的应用需求驱动是密不可分的,过去十年也是一个应用验证与SNSPD技术发展互相成就的十年。比如,光纤量子密钥分发的距离不断创造新纪录,从2014年的200 km到2021年的600 km,都离不开高性能SNSPD的使用。从光量子计算的飞速发展到两代“九章”光量子计算原型机的诞生,SNSPD可以说是系统的使能技术。2013年美国NASA的LLCD项目,利用地面基站的高速SNSPD阵列,首次实现了绕月轨道卫星和地球之间的直接光通信,最高速度达到622 Mbps,被誉为空间光通信的里程碑^[8]。大量的其他应用无法一一罗列,相信未来还会有更多新型应用不断涌现。

大量的应用需求也推动了SNSPD的产业化。目前国际上共有6家以SNSPD为核心产品的小型高科技公司,包括中国唯一一家由中国科学院上

海微系统与信息技术研究所孵化的赋同量子科技(浙江)有限公司^[20]。这些公司的产品性能基本处于同一水平。令人自豪的是,赋同量子科技(浙江)有限公司不仅实现了SNSPD系统的商业化销售,还实现了对部分已进口产品的升级替代,且国内市场占有率达到六成以上,彻底改变了该领域高端科研装备主要依赖进口的局面。

7 展望

SNSPD经过20年的发展,其性能优势已经得到了充分的证明,它将会在量子信息领域持续发挥不可替代的作用。同时,量子信息技术以及其他领域的发展也对SNSPD提出了更高的要求。比如面向自由空间应用需求,如何实现大光敏面和更高速度的SNSPD;能否实现其他波长,比如中远红外、紫外以及X射线等波段的高性能SNSPD;能否进一步提升工作温度,提高SNSPD系统的综合竞争力(尺寸、重量及功耗)。这些问题都等待着SNSPD领域研究人员去解决。我们对SNSPD的未来发展和应用也充满信心。

参考文献

- [1] Zhong H S *et al.* *Science*, 2020, 370(6523): 1460
- [2] Zhong H S *et al.* 2021, arXiv: 2106.15534
- [3] You L X. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673
- [4] Chen J P *et al.* *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 570
- [5] Pittaluga M *et al.* *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 530
- [6] Liu Y *et al.* *Nature*, 2018, 562(7728): 548
- [7] Shalm L K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115(25): 250402
- [8] Grein M E *et al.* An optical receiver for the Lunar Laser Communication Demonstration based on photon-counting superconducting nanowires. In: *Advanced Photon Counting Techniques IX*, 2015, vol. 9492: International Society for Optics and Photonics, p. 949208
- [9] Yu S *et al.* 2020, arXiv: 2012.00674
- [10] Chen L, Lau J A, Schwarzer D *et al.* *Science*, 2019, 363(6423): 158
- [11] Gol'tsman G N *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(6): 705
- [12] Hadfield R H, Habif J L, Schlafer J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(24): 241129
- [13] Hu P *et al.* *Opt. Express*, 2020, 28(24): 36884
- [14] Reddy D V, Nerem R R, Nam S W *et al.* *Optica*, 2020, 7(12): 1649
- [15] Chang J *et al.* *APL Photonics*, 2021, 6(3): 036114
- [16] Zhang W J *et al.* *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(3): 035012
- [17] Zhang W *et al.* *IEEE T. Appl. Supercon.*, 2019, 29(5): 2200204
- [18] Korzh B *et al.* *Nature Photonics*, 2020, 14(4): 250
- [19] Hu P *et al.* *Superconductor Science and Technology*, 2021, 34(7): 07LT01
- [20] <https://www.cnphotec.com/>
- [21] Vodolazov D Y. *Phys. Rev Lett.*, 2017, 7(3): 034014
- [22] Xu G Z *et al.* *Photonics Research*, 2021, 9(6): 958
- [23] <https://webstore.iec.ch/publication/26674>