文章编号: 1007－4252(2025)01－0001－10　　DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0006

高速超导纳米线单光子探测器研究进展

陈敬学, 李　浩*

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050)

摘要: 超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是一种新型单光子探测器, 相较于传统的单光子探测器, 其具有高探测效率、低暗计数、高计数率、低时间抖动等优势, 近年来在量子信息、激光雷达等领域大放异彩。随着技术的发展, 量子通信、深空通信等应用对 SNSPD 的响应速度(即计数率)提出了更高的要求。本文首先介绍超导纳米线单光子探测器的基本原理, 随后着重描述近年来高速 SNSPD 的研究进展, 包括限制探测器计数率的因素及提升 SNSPD 计数率的方法, 最后对高速 SNSPD 的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 超导单光子探测器; 高速; 量子通信

中图分类号: O511+.9　　**文献标志码:** A

Research progress of high speed superconducting nanowire single-photon detector

CHEN Jing-xue, LI Hao*

(State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, ShangHai 200050, China)

Abstract: The superconducting nanowire single-photon detector (SNSPD) represents a novel class of single-photon detection devices. Compared with traditional single-photon detectors, it has advantages such as high detection efficiency, low dark count rate, high count rate and low timing jitter. In recent years, it has made remarkable achievements in fields like quantum information and laser radar. With the advancement of technology, applications such as quantum communication and deep-space laser communication have imposed higher requirements on the response speed (i.e. count rate) of SNSPDs. This paper first provides a brief introduction to the basic principles of SNSPDs, and then focuses on the research progress of high-speed SNSPDs. It mainly includes the factors restricting the count rate of SNSPDs and several methods to increase the count rate. Finally, the future development trends of high-speed SNSPDs are prospected.

收稿日期: 2025−02−12;　　**修订日期:** 2025−02−26

基金项目: 国家自然科学基金项目(U24A20320)、“量子通信与量子计算机”国家科技重大专项(2023ZD0300100).

作者简介: 陈敬学(2001-), 男, 硕士在读, 研究方向为高速超导纳米线单光子探测器, E-mail: chenjingxue@mail.sim.ac.cn.

通信作者: 李　浩, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为超导单光子探测技术, E-mail: lihao@mail.sim.ac.cn.

Key words: superconducting single-photon detector; high speed; quantum communication

0 引言

量子信息科学是一门基于量子力学原理实现信息处理的前沿学科，在计算能力、通信安全性和测量精度等方面都实现了对传统信息技术性能极限的革命性突破，为信息技术的发展开辟了新的范式。而光量子信息技术作为其核心领域，以单光子为信息载体，融合了量子物理学、光学工程和计算机科学等多个学科，是新一代信息技术的重要代表。随着光量子信息技术的发展，单光子探测器 (SPD) 作为一类具备单光子级探测能力的精密探测器，也得到了飞速发展，在量子密钥分发、激光雷达、光量子计算、深空通信、生物荧光探测、暗物质探测等领域中发挥了至关重要的作用。

根据探测器所用材料的不同，SPD 可分为半导体单光子探测器和超导单光子探测器。根据器件探测原理的不同，半导体单光子探测器主要包括光电倍增管 (PMT[1])、单光子雪崩光电二极管 (SPAD[2]) 等；而超导单光子探测器则包括超导转变沿探测器 (TES[3])、超导纳米线单光子探测器 (SNSPD[4])、超导隧道结探测器 (STJ[5]) 等。以下是衡量单光子探测器性能的主要指标：

1）探测效率

探测效率（Single-Photon Detection Efficiency, SDE）是表征单光子探测器性能的核心技术指标，其定义为实际探测到的光子计数与总输入光子数的比值。该参数综合反映了探测系统的整体性能，受光学耦合效率、光吸收效率以及本征探测效率等多个关键因素的影响。作为评估单光子探测器实用性能的最重要指标之一，SDE直接影响着量子通信系统的传输距离、量子密钥分发的成码率以及量子计算的信噪比等关键应用性能。

2）暗计数

暗计数的定义是 SPD 在没有光子入射时产生的计数，它代表了探测器的噪声水平。其主要来源包括环境杂散光、电子学读出噪声以及光纤耦合的黑体辐射等本底干扰。暗计数率（DCR）表示单位时间（通常为每秒）内暗计数的数量，是表征探测器噪声水平的重要指标。DCR 与 SDE 共同决定探测系统的信噪比（SDE/DCR）。

3）计数率

计数率，指探测器每秒能够输出的光响应数量，也被称为探测器的“速度”。高速探测器即具有高计数率的探测器。当探测器接收到光信号并生成光响应后，需要一段时间的恢复才能探测下一个光信号，这段时间被称为探测器的恢复时间。理论最大计数率与恢复时间成反比，反映了探测器的响应速度。该指标在深空通信、量子通信和激光雷达等应用中尤为重要。

4) 时间抖动

时间抖动（timing jitter, T_j）的定义为探测脉冲与光源脉冲（固定重复频率）响应时间差的不确定性。在基于光子飞行时间的应用（如激光测距）中，可以利用 T_j 将时间信息转换为位置分辨信息；降低探测器的时间抖动，可以直接提高测量的精度。

5）光子数分辨率

光子数分辨率反映了在同时入射多个光子的场景中，器件对光子数量的分辨能力。在如深空通信的自由空间通信中，光子数分辨能力强的 SPD 可探测更多的光子数，拥有更低的误码率，可以获得更大的通信带宽。

一个理想的单光子探测器应当具备以下性能参数：探测效率为 100%，暗计数为 0，时间抖动为 0，恢复时间为 0，并且具有良好的光子数分辨能力。然而，现实中的探测器与理想情况还有不小差距。不同的探测器在不同的应用场景中各有优劣，如 PMT 可以在常温下工作，并且具有较大的光敏面尺寸，具有较好的光耦合性能，但效率和最大计数率很低[1]。TES 具备优良的光子数分辨能力，在光谱分析、高能物理和核辐射探测中发挥着重要作用，但过高的时间抖动与恢复时间限制了它在通信等领域的发展[3]。

SNSPD 在探测效率（>95%）、暗计数（<1 Hz）、时间抖动（<10 ps）、以及最大计数率（最大超过 1 Gcps）等方面具有优异的性能，适用于远距离、高精度、高速率的量子探测，在量子计算[6]、激光雷达、深空通信等方面具有不可替代的优势。因此，SNSPD 近年来在单光子探测领域获得了广泛的关注与应用。目前，研究 SNSPD 的大学或研究机构主要有：中国科学院上海微系统与信息技术研究所、

南京大学(NJU)、天津大学(TJU)、美国国家标准与技术研究院(NIST)、日本情报通信研究机构(NICT)等。研发 SNSPD 的公司主要有: 赋同量子科技有限公司、荷兰 Single Quantum、俄罗斯 Scontel、美国 Photon Spot、美国 Quantum Opus 等。

近年来, 随着激光雷达、深空通信等前沿技术的发展, 相关应用对 SNSPD 的计数率提出了更高的要求。例如, 应用于激光雷达时, SNSPD 的计数率直接影响激光雷达的扫描速度, 进而影响其精度; 应用于深空通信时, SNSPD 的计数率也会影响信道通信的码率[7]。2014 年, 美国国家航空航天局(NASA)通过在地面端应用高速 SNSPD 阵列(最大计数率~350 Mcps), 成功实现了月地下行传输速率高达 622 Mbps 的月地激光通信(LLCD)演示实验[8]。2024 年, NASA 为深空光通信项目(DSOC)研制了自由空间耦合超导纳米线单光子探测器阵列(最大计数率~1 Gcps), 成功实现了高达 267 Mbps 的下行链路数据传输速率[9]。因此, 研制具有高计数率的 SNSPD 具有非常重要的现实意义。

1　SNSPD 简介及其高速工作原理

2001 年, Gol'tsman 等人利用超薄氮化铌薄膜制成极窄纳米线结构, 成功实现了对单光子的探测[10-11]。目前, 用于解释 SNSPD 工作机制的理论模型主要包括热点模型、准粒子扩散热点模型等。但是, 这些理论都无法完美地解释所有实验现象。本文将通过 SNSPD 的热点模型, 简单解释 SNSPD 检测光子的宏观机制。

图 1 展示了 SNSPD 的光子检测过程。初态时, SNSPD 处于超导状态, 此时工作温度低于超导转变温度(T_c), 工作电流(I_b)低于超导转变电流(I_c)。随后, 当具有一定能量的光子入射到超导纳米线时, 会形成一个具有一定阻值的"热点"。由于"热点"区域存在电阻, 电流在流经此区域时, 会更密集地分布在仍在超导态的"热点"区域两侧。随着偏置电流被进一步挤压到"热点"的两侧, 该区域的电流会超过其转变电流, 从而导致"热点"两侧区域的失超。此时, 纳米线的横截面上会出现一条有阻区; 有阻区的电阻(约 5 kΩ)远大于读出电路的电阻(约 50 Ω), 这使得偏置电流流向读出电路, 外部探测模块便可以探测到电压脉冲变化的波形。在焦耳热的作用下, 有阻区会沿着纳米线的长度方向迅速扩展。然而, 由于外部电路对电流的分流作用和衬底的热扩散作用, 有阻区的扩展会达到一个稳定范围。在衬底的热扩散作用下, 纳米线上的有阻区迅速消失, 恢复到原先的超导状态。

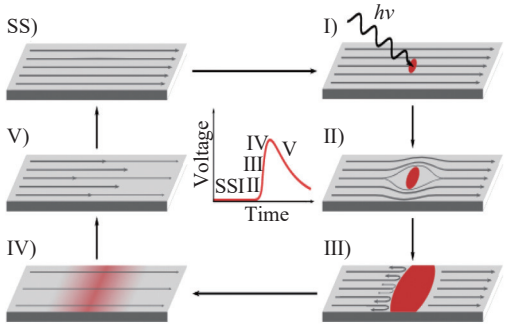

图 1　SNSPD 探测过程示意图[12]

Fig. 1　Schematic diagram of the detection process of SNSPD

SNSPD 的热弛豫过程, 是指从纳米线上产生"热点", 到出现横跨纳米线的有阻区, 再到有阻区消失的过程。该过程的时间被定义为热弛豫时间(τ_{th}), 其数值一般在 100 ps以内。而 SNSPD 的电弛豫过程, 是指从 SNSPD 检测到光子到超导纳米线冷却的过程中, 电流从负载电阻流回超导纳米线的过程, 相应的时间尺度被定义为电弛豫时间(τ_e), 一般在 10 ns 以内。只有当所有电流全部从纳米线上流过时, 器件才可以检测到第二个光子。张露等人[13]表征了器件闩锁(器件稳定在有阻态, 无法继续探测光子的现象)与电弛豫时间和热弛豫时间的关系。如图 2 所示, 当 τ_e/τ_{th}<130 时, 器件无法在较高的偏置电流下工作, 这无疑大大降低了其计数率。因此, 为了提高 SNSPD 的本征计数率, 需要在维持器件电热平衡(以保证器件不发生闩锁)的基础上, 加快 SNSPD的电热弛豫过程。

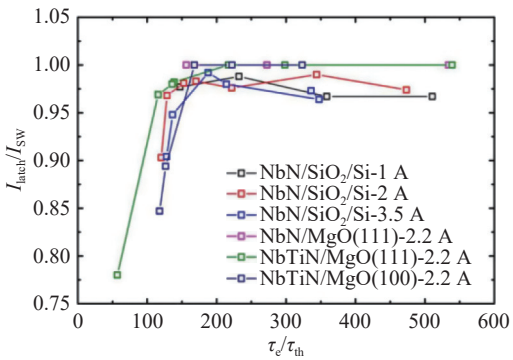

图 2　归一化闩锁电流随器件电、热弛豫时间比值的变化图[13]

Fig. 2　Normalized latching current as a function of τ_e/τ_{th}

通过采用多晶材料薄膜、改善衬底界面等方式，可以有效减少 SNSPD 的热弛豫时间。理论上，SNSPD的本征极限响应速度是热弛豫时间的倒数，目前研究人员通过采用 MgO 衬底，将热弛豫时间优化到最低 10 ps 量级[14]。但是，目前研制的高速器件还无法达到电热平衡的极限，因此目前热弛豫时间并不是影响计数率的瓶颈，限制 SNSPD 计数率的主要因素是电弛豫时间。

图 3 是示波器采集的 SNSPD 器件的电弛豫过程中的响应波形。器件的恢复时间是指上升时间 τ_{rise} 和下降时间 τ_{fall} 的差，而上升时间和下降时间分别定义为在上升沿和下降沿脉冲峰值的 $1/e$ 和峰值所对应的时间之差，如下式所示

$$\tau_{rise}=\frac{L_k}{R_n+Z_0} \tag{1}$$

$$\tau_{fall}=\frac{L_k}{Z_0} \tag{2}$$

其中，L_k 为纳米线的动态电感（单位为 H），R_n 为纳米线有阻区的电阻（单位为 Ω），Z_0 为负载阻抗（单位为 Ω）。通常 SNSPD 读出电路中的负载阻抗为 50 Ω，改变负载阻抗很容易引起阻抗不匹配。因此，动态电感 L_k 是影响 SNSPD理论恢复时间与最大计数率的重要因素。

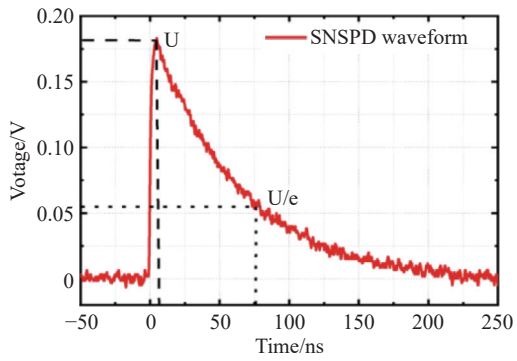

图 3 典型 SNSPD 信号波形[15]

Fig. 3 Typical signal waveform of SNSPD.

此外，读出电路也会影响 SNSPD 器件的实际计数率，导致其达不到理论上的最大计数率。在传统的交流耦合读出方式中 (如图 4 所示)，当入射光功率增加时，器件的计数率也随之增加，使放大器前端的耦合电容放电不完全，导致电荷的积累。当电荷积累到一定程度后，它会作用到纳米线上从而增加其内部的偏置电流；当入射光功率进一步增加时，这一效应会导致器件的实际偏置电流 I_d 大于 I_c，此时器件因为失超而不能正常工作，使得 SNSPD

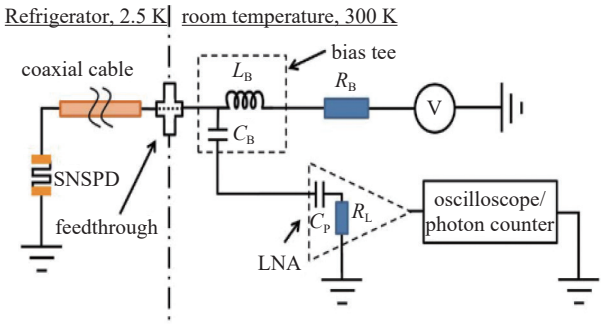

图 4 交流耦合读出方式示意图[16]

Fig. 4 Schematic diagram of AC-coupling readout scheme.

的实际计数率低于理论的最大计数率。通过采取直流耦合、并联滤波等方式可以降低容性耦合带来的这种影响。

总的来说，器件动态电感影响理论最大计数率，读出电路影响实际计数率。因此，研究人员对于器件速度的提高，主要从两方面着手：一方面是从器件自身出发，降低器件的动态电感，优化器件的薄膜与衬底材料、纳米线参数以及器件结构等；另一方面则是从电路层面出发，对读出电路和输入阻抗等方面进行优化。

2 高速 SNSPD 的发展

如前所述，目前高速 SNSPD 的技术方向主要包括减小动态电感和优化读出电路。其中，减小动态电感又可以通过以下三种方式来实现：优化单通道单像素器件、多个 SNSPD 像素单通道输出、多像元阵列（N-pixel）结构 SNSPD 多通道输出。同时针对实际应用需求，高速 SNSPD 器件还应同时具备高效率的性能。基于这几种技术路线，SNSPD 的最大计数率已经超过 1 Gcps。本节将着重介绍基于减小动态电感方法的高速器件的研究进展。

2.1 单通道单像素器件（计数率~10 Mcps）

2.1.1 减小光敏面

减小光敏面可以有效减小器件的动态电感。黄佳等人表征了 SNSPD 器件光敏面与恢复时间之间的关系，结果发现，在保证器件的线宽与周期不变的情况下，当器件光敏面直径为 10 μm、15 μm 和 20 μm 时，器件的恢复时间分别为 3.3 ns、5.6 ns 和 7.9 ns，可见光敏面尺寸的变化对恢复时间的影响十分显著[17]。2023 年，郗玲玲等人制备了直径为 12 μm 的光敏面，获得了 12 ns 的恢复时间和 40

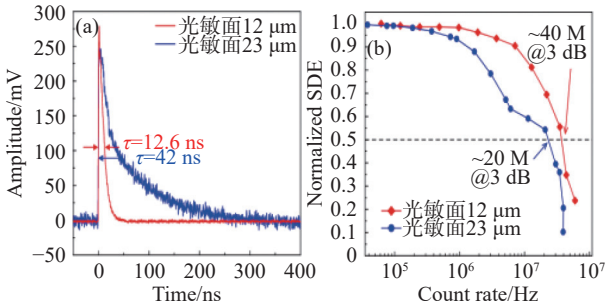

图 5　12 μm 光敏面器件与 23 μm 光敏面器件恢复时间波形(a)及计数率曲线(b)[18]

Fig. 5 The waveform of recovery time (a) and counting rate curves (b) for the devices with the active areas of 12 μm and 23 μm.

Mcps 的计数率。图 5(a)和(b)分别显示了器件在光敏面直径为 12 μm 和 23 μm 时的恢复时间和计数率对比[18], 前者的恢复时间只有后者的 1/3, 而 3 dB 时其计数率提高了一倍。减小光敏面方法的优势在于可实施性高, 同时带来了加工良率、抖动等方面的提升; 但随着光敏面的减小, 光耦合效率会显著降低。

2.1.2 减小占空比(结合谐振腔)

SNSPD 的占空比是指纳米线在光敏面上填充的比例。减小占空比可以有效减小器件动态电感, 但同时会大大降低光耦合的效率。因此, 在减小器件占空比时, 需要通过集成谐振腔等方式, 将光场局域在谐振腔内, 保证高效的光子吸收。2013 年, Taro 等人制备了占空比为 18% 的 SNSPD器件, 他们通过在器件表面制备分布式布拉格(DBR)反射镜, 获得了 68.7% 的 SDE 以及大于 10 Mcps 的计数[19]。2019年, 李德志等人在 SNSPD 器件表面制备硅槽与银反射镜, 如图 6 所示, 在 16.5% 的低占空比下获得了 84.4% 的效率[20]。2023 年, 肖游等人在 SNSPD 上集成了光子晶体, 来填充形成光子晶体谐振腔。如

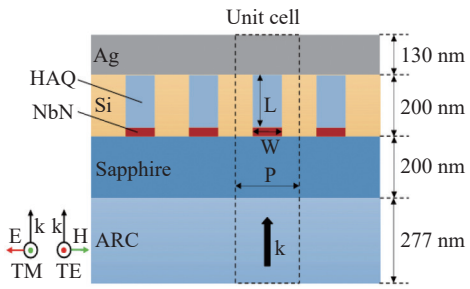

图 6　带有硅槽和银反射镜的 SNSPD 的堆叠结构示意图[20]

Fig. 6 Schematic diagram of stacked structure of SNSPD with silicon groove and silver reflector.

图 7 所示, 通过光子晶体谐振腔将光场局域在谐振腔内, 保证了高效的光子吸收。他们以 12% 的占空比获得了 60% 的 SDE以及 80 Mcps 的最大计数率[21]。

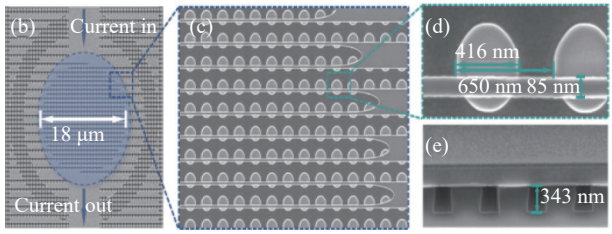

图 7　集成光子晶体谐振腔的 SNSPD 示意图[21]

Fig. 7 Schematic diagram of SNSPD with integrated photonic crystal resonator.

2.1.3 减小线长(结合光波导耦合)

减小线长可以有效降低 SNSPD 器件的动态电感, 但是短线长会引起光耦合的大部分光子的损失, 导致极低的 SDE, 不利于实际应用。通过光波导耦合的方式, 可以极大加强光子吸收效率。2009 年, 胡小龙等人首次提出了波导集成的 SNSPD[22]。2012 年, Pernice 等人尝试将 10 μm 长的 U 型纳米线与光波导耦合, 将 SNSPD 的恢复时间降到了 450 ps[23]。2016 年, Vetter 等人采用线长< 1 μm 的超短纳米线并使其垂直于光波导, 同时结合光子晶体谐振腔集成的方式, 如图 8 所示, 进一步将恢复时间降低至 119 ps。但受到外散射损耗的影响, 片上探测效率低至 30%[24]。目前, 由于此方案的光耦合效率仍很低, 难以测试计数率。因此, 这种方式仅能表征器件的恢复时间, 有待研究人员的进一步优化。

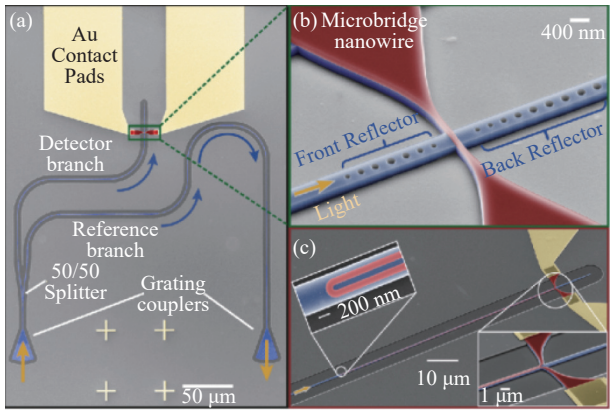

图 8　集成光波导的 SNSPD[24]

Fig. 8　SNSPD integrated on optical waveguide.

2.2　单通道多像素器件(计数率~100 Mcps)

利用空间复用方案实现高计数率 SNSPD 是一

个重要研究方向，该方案可以同时兼顾速度、效率、以及光子数分辨能力。在空间复用方案的多像素单通道 SNSPD 结构中，多个像素形成一个大面积的纳米面感光区，共用同一个偏置电源，输出端脉冲合成一路输出。相较于单个具有相同电感的传统单像素 SNSPD，N 像素 SNSPD 中每个探测器单元的动态电感减小到了 1/N，同时探测器数量增加到了 N 倍，因此理论最大探测速度相比传统 SNSPD 有 N^2 倍的提升。采用目前空间复用方案的单通道多像素 SNSPD 器件，主要有并联超导纳米线探测器（PND）和串联超导纳米线探测器（SND）。

2.2.1 SNAP 器件及并联结构

2007 年，Ejrnaes 等人设计了第一代单通道输出空间复用 SNSPD（如图 9 所示），由于其工作原理类似雪崩效应，被称之为 SNAP 器件（superconducting nanowire avalanche single-photon detectors）[25]。在 SNAP结构中，由同一个电流源对 N 根纳米线像元提供偏置，不同像元间采用并联的方式连接。其工作原理为：所有纳米线同时偏置在转变电流附近，当某一纳米线吸收光子而失超后，其电流会流入其它纳米线，使其他的并联纳米线的偏置电流剧烈增加并失超，近似雪崩效应。SNAP 器件减小了器件的电感，使器件的计数率大大提升；同时由于采用了并联结构，器件的转变电流是单个器件的 N 倍，所以也提高了器件的信噪比。2008 年，Divochiy 等人采用并联结构，在 MgO 衬底上制备了 6 像素 SNAP，获得了 80 Mcps的计数率[26]。2019 年 Moshkova 等人研制的 4 像元并联结构 SNSPD（PND），具有 86% 的系统探测效率、2 ns 的恢复时间和最大 90 ps 的时间抖动[27]。

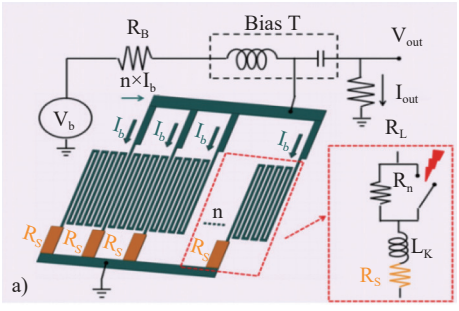

图 9 SNAP 的等效电路示意图[25]

Fig. 9 Equivalent circuit diagram of SNAP.

然而，随着输入光子数的增加，同时工作的像素增多，流经其他非失超像素的电流会不断升高甚至高于转变电流，很容易导致器件闩锁。2021 年，Matthieu 等人提出了在并联纳米线结构中增加一些低电感的泄流支路的方案。这些支路被放在光纤纤芯的外部，以避免暴露在光照下，从而不会因为接收到光子导致失超，因而可以很好地接受其他像素失超时带来的额外偏置电流，避免器件整体闩锁[28]。2024 年，Lorenzo 等人采用上述结构，制备了 28 像素的并联结构和 10 条泄流支路，较好地解决了并联结构在多光子同时入射时的闩锁问题。如图 10 所示，该器件获得了 88% 的效率以及 3 dB 时 250 Mcps 计数的性能，为目前并联纳米线结构中的最好性能[29]。并联的纳米线结构可以获得良好的计数率性能和信噪比，但也存在漏电流容易闩锁、分流支路会影响脉冲信噪比、恶化抖动等问题。

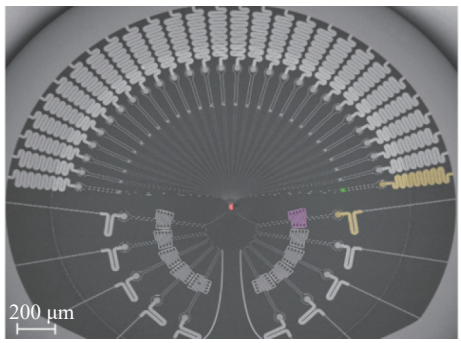

图 10 28 像素并联纳米线与 10 个泄流支路结构图[29]

Fig. 10 Structural diagram of 28 pixel parallel nanowires and 10 leakage branches.

2.2.2 串联结构

串联纳米线 SND 是另一种超导纳米线阵列结构，它类似于 PND 的对称结构，以纳米线并联电阻为单元，多个单元串联而成，其等效电路如图 11 所示[30]。器件采用一个偏置电源，且每个像素均被偏置在略低于 I_c 处。当某一像素吸收光子失超后，由于纳米线电阻区的电阻远远超过并联电阻，偏置

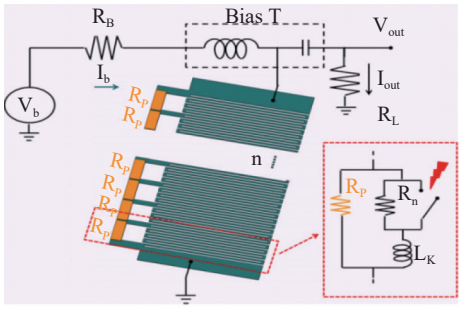

图 11 SND 的等效电路示意图[30]

Fig. 11 Equivalent circuit diagram of SND.

电流会分流到并联的电阻和读出电路的等效负载上, 读出端产生电压脉冲[31]。Jahanmirinejad 等人首次将这一构想付诸实践, 在 GaAs 衬底上基于 NbN 材料制备了一个 4 像元 SNDs[32]。2024 年, 郝浩等人串联了六个像素, 并通过鱼骨型电阻加快器件散热, 如图 12 所示。该器件获得了 3 dB 时 380 Mcps 的计数率, 为目前串联结构的最高性能[33]。

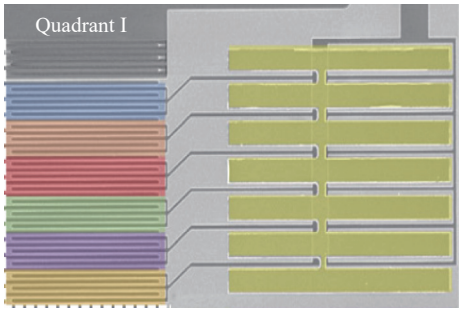

图 12　6 像素 SND 及鱼骨电阻图[33]
Fig. 12　Diagram of 6-pixel SND and fishbone resistance.

由于并联了电阻, 串联结构在高计数率下不会产生闩锁的现象, 不需要在光功率不断增加的时候不断减少偏置电流, 可以更加稳定地测得计数率。但是也正因为并联了电阻, 信号输出的幅值和信噪比都比较低。

2.3　多通道器件(计数率~Gcps)

N-pixel 方案, 也称 SNSPD 多像元阵列, 可以理解为将上述 SND 或者 PND 方案中级联后单一输出的方式转换为并行多通道输出, 技术的关键点在于设计合适的读出方式。中 N-pixel 方案中, 各像素的脉冲信号均独立输出, 因此输出信噪比较好。然而, 一个 N 像元阵列一般需要 N 路偏置电路和 N 路读出电路, 同轴电缆是良好的热导体, 如果使用大量的同轴电缆进行读出, 会带来严重的漏热问题。

N-pixel SNSPD 的方法由 Dauler 等人于 2007 年首次使用[34], 其构型为: N 根纳米线相互独立并行蜿蜒成一定光敏面大小的 N-pixel SNSPD 阵列, 纳米线被分割为 N 个区域。与单个拥有相同光敏面大小的传统结构 SNSPD 相比, 整个 SNSPD 阵列的动态电感下降到其 1/N。2013 年, MIT 实验室的科研人员采用互嵌式多根并行纳米线结构, 制备了 4 像素 SNSPD 阵列; 其单像素的恢复时间仅为 5 ns, 最大计数率(MCR)约 350 Mcps, 该阵列的 NbN 纳米线厚度仅有 5 nm 且纳米线宽度仅有 80 nm, 这使得该器件的转变电流只有 6.5 μA, 极大限制了输出波形的信噪比[35]。2019 年, 黄佳等人将互嵌像素数提升到了 9 个, 实现了 2.2 K 工作温度下 70% 的最高探测效率以及 0.93 Gcps 的最大计数率[36]。2020 年, 该团队将像素数目拓展至 16 个, 在直径 15 μm 的总光敏面下实现了 72% 的最大探测效率和 1.5 Gcps的最大计数率[37], 如图 13 所示。2023 年, Giovanni团队对互嵌式 N-Pixel SNSPD 进一步优化, 基于 14 像素嵌套纳米线器件, 实现了 90% 的系统探测效率; 在对 1.5 GHz 的通信光子的探测中, 可达到 SDE 为 45% 的性能[38]。2024 年, 张天柱等人设计了 64 像素 N-Pixel 器件, 采用互嵌式结构, 通过优化纳米线拐角以最小化电流拥挤效应, 实现了 90% 的系统探测效率以及 5.2 Gcps 的最大计数率[39]。

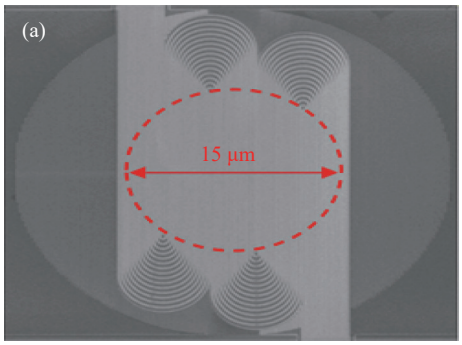

图 13　互嵌纳米线阵列结构[37]
Fig. 13　The structure of embedded nanowire arrays.

N-pixel SNSPD 阵列结构在高计数率方面具有很大的发展潜力, 但是目前受到薄膜均一性、像素良率、低温低噪声读出技术以及制冷机热负载无法支持过多同轴电缆等因素的制约。目前, 超大规模超高计数 SNSPD 阵列还没有理想的解决方案。

2.4　高速 SNSPD 的应用

2.4.1 高速量子通信

量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)基于量子力学的基本原理, 理论上能够实现无条件安全的保密通信。在实际应用中, 提升 QKD 的密钥生成速率(Secret Key Rate, SKR)是当前最迫切的技术挑战之一。较高的 SKR 不仅能够支持更频繁的密钥更新, 还可为大规模量子通信网络中的多用户并发通信提供保障[40]。此外, 在关键基础设施保护、医疗数据安全共享、分布式存储加密等高带

宽应用场景中[41,42]，高速 QKD 系统的研发对于满足实际应用需求具有重要意义。高速、高效率的 SNSPD 器件可以大大提升 QKD 的密钥率。2023 年，中国科学技术大学的潘建伟、徐飞虎团队发展了集成光子片上高速高保真度偏振态调制技术，结合中国科学院上海微系统所研制的八像素高速 SNSPD，实现了百兆比特率的实时量子密钥分发，在每秒输入 5.5 亿个光子时仍能保持 62% 的探测效率，将此前的成码率纪录提升一个数量级[43]。

2.4.2 深空通信

随着量子通信、深空光通信等前沿技术的迅速发展，人们对单光子探测器的需求逐渐从高效、低暗计数，逐渐转向对高速响应和多光子数分辨能力的更高要求。例如，在空间光通信中，采用高速单光子探测器（SPD）可以显著提高数据传输速率。2014 年，美国国家航空航天局（NASA）在地面端部署最大计数率 350Mcps 的高速 SNSPD 阵列，成功实现了月地激光通信（LLCD）演示实验。随后 NASA 在与 JPL 实验室合作开展的深空光通信（DSOC）项目中，计划采用计数率超过 Gcps 的 SNSPD 阵列，以满足从火星到地面的高速下行传输需求[44]。2024 年，NASA 为深空光通信项目（DSOC）研制了自由空间耦合超导纳米线单光子探测器阵列。该阵列由 64 个像素组成，计数率超过 1 Gcps，作为 DSOC 的主地面接收终端的下行探测器，被部署于帕洛马天文台的 200 英寸哈勒望远镜[9]。

3 总结与展望

总的来说，目前研究人员通过上述方式，已经将 SNSPD 的最大计数率提升到了 Gcps 级别，使其在激光雷达、深空通信、单光子成像等领域大放异彩。但是高速 SNSPD 在应用上仍然存在制冷成本高、时间抖动高等问题，亟需研究人员解决。其未来发展将主要围绕以下几个方面：

1）集成低温电子学的 SNSPD 阵列

由于单通道 SNSPD 像元增多时，脉冲输出幅值会降低，因此单通道内 SNSPD 像元的个数存在极限。当追求更高速的 SNSPD 时，如何将单通道内的多像素 SNSPD 的性能发挥至极限，并将其拓展至多通道，同时优化制冷机的热负载问题，是未来更大规模高速 SNSPD 阵列发展的一个重要方向。

2）更小时间抖动

降低 SNSPD 器件的时间抖动，可以提升激光雷达的深度分辨率，降低深空通信的误码率[45]。目前的高速 SNSPD 无法兼具高计数率和低时间抖动两种性能。研究用于读出的低功耗的低温放大器，并研发差分双端读出电路，可以减小噪声时间抖动和本征时间抖动[14]，为极低时间抖动 SNSPD 的研发创造条件。

3）基于其它材料的 SNSPD

对基于其它材料的 SNSPD 的研究主要指向两个方面：进一步提升计数率和提高超导临界温度。在提升计数率方面，理论上 NbTiN 材料的动态电感小于 NbN 材料，因此具有更高的理论计数率。然而目前大部分研究人员都将精力投入到对 NbN 材料的优化上，对 NbTiN 材料的高速性能表征较少。另一方面，更高临界温度的 SNSPD 可以更好的应用于深空通信、激光雷达中，减轻配套降温设备的压力。Shibata 等人发现利用 MgB_2 制备的 SNSPD 可以在 4.2 K 甚至更高的温度下工作[46]；Ejrnae 等人则在基于高温超导体 YBCO 的 SNSPD（T_c = 80 K）上观察到了暗计数现象[47]。这些研究为高温 SNSPD 的实现提供了有力的支持。

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] Bronzi D , Villa F , Tisa S , et al. SPAD Figures of Merit for Photon-Counting, Photon-Timing, and Imaging Applications: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(1): 3-12.

[3] Lita A, Miller A, Nam S, et al. Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency[J]. Optics Express, 2008, 16(5): 3032-3040.

[4] Marsili F , Verma V B , Stern J A , et al. Detecting Single Infrared Photons with 93% System Efficiency[J]. Nature Photonics, 2012, 7(3): 210-214.

[5] Shiki S, Fujii G, Ukibe M. et al. Development of Superconducting Tunnel Junction X-ray Detector with High Absorption Yields Utilizing Silicon Pixel Absorbers[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2016, 184: 206-210.

[6] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, et al. Quantum computational advantage using photons[J]. Science, 2020, 370: 1460-1463.

[7] 胡小龙, 胡南, 邹锴, 等. SNSPD 二十年: 回顾与展望 [J]. 激光技术, 2022, 46(1): 1-37.

[8] Murphy D V , Kansky J E , Grein M E , et al. LLCD operations using the Lunar Lasercom Ground Terminal[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710V.

[9] Emma E. Wollman, Jason P. Allmaras, Andrew D, et al. SNSPD-based detector system for NASA's Deep Space Optical Communications project[J]. Optics Express, 2024, 32(27): 48185-48198.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Iman Esmaeil Zadeh, J. Chang, Johannes W. N. Los, Samuel Gyger, 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.

[13] 张露. 超薄超导 NbN 系薄膜制备及热弛豫时间研究 [D]. 上海: 上海微系统与信息技术研究所, 2019.

[14] Zhang L, You L X, Yang X Y. et al. Hotspot relaxation time of NbN superconducting nanowire single-photon detectors on various substrates[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1486.

[15] 董玉奇. 高计数率、低抖动超导单光子探测器电路研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.

[16] Lv C L, Zhang W J, You L X, et al. Improving maximum count rate of superconducting nanowire single-photon detector with small active area using series attenuator[J]. AIP Advances, 2018, 8(10): 105018.

[17] 黄佳. 高速、光子数可分辨的超导纳米线单光子探测阵列 [D]. 上海: 上海微系统与信息技术研究所, 2019.

[18] Xi L L, Yang X Y, Zhang T Z, et al. High comprehensive performance superconducting nanowire single photon detector[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(11): 118501.

[19] Taro Y, Shigehito M, Hirotaka T, et al. Low-filling-factor superconducting single photon detector with high system detection efficiency[J]. Optics Express, 2013, 21: 27177-27184.

[20] Li D Z, Jiao R Z. Design of a low-filling-factor and polarization-sensitive superconducting nanowire single photon detector with high detection efficiency[J]. Photonics Research, 2019, 7: 847-852.

[21] Xiao Y, Cao X Y, Liu X Y, et al. Ultralow-filling-factor superconducting nanowire single-photon detector utilizing a 2D photonic crystal[J]. Photonics Research, 2023, 11: 2128-2135.

[22] Hu X L, Holzwarth CW, Masciarelli D, et al. Efficiently coupling light to superconducting nanowire single-photon detectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 336-340.

[23] Pernice W, Schuck C, Minaeva O, et al. High-speed and high-efficiency travelling wave single-photon detectors embedded in nanophotonic circuits. Nature Communications, 2012, 3: 1325.

[24] Vetter A, Ferrari S, Rath P, et al. Cavity-Enhanced and Ultrafast Superconducting Single-Photon Detectors[J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7085–7092.

[25] M. Ejrnaes, R. Cristiano, O. Quaranta, et al. A cascade switching superconducting single photon detector[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(26): 262509.

[26] Divochiy A , Marsili F , Bitauld D , et al. Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths[J]. Nature Photonics, 2008, 2(6): 302-306.

[27] Maria M, Alexander D, Pavel M, et al. High-performance superconducting photon-number-resolving detectors with 86% system efficiency at telecom range[J]. JOSA B, 2019, 36(3): B20-B25.

[28] Perrenoud M, Caloz M, Amri E, et al. Operation of parallel SNSPDs at high detection rates[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(2): 024002.

[29] Stasi L, Taher T, Resta G V, et al. Enhanced Detection Rate and High Photon-Number Efficiencies with a Scalable Parallel SNSPD[J]. ACS Photonics, 2025, 12(1): 320–329.

[30] Francesco M, Zhou Z L, Alessandro G, et al. Photon-number-resolving superconducting nanowire detectors[J]. Superconductor Science and Technology, 2015, 28(10): 104001.

[31] Jahanmirinejad S , Fiore A . Proposal for a superconducting photon number resolving detector with large dynamic range[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 5017.

[32] Jahanmirinejad S , Frucci G , Mattioli F , et al. Photon-number resolving detector based on a series array of superconducting nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(7): 072602.

[33] Hao H. , Zhao Q Y. , Huang Y H. et al. A compact multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array supporting gigabit space-to-ground communications[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 25.

[34] Kerman A J, Robinson B S; Barron R J, et al. Superconducting nanowire single-photon detectors[C]. 2006 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, Quebec City, QC, 2006: 9-10.

[35] Rosenberg D , Kerman A J , Molnar R J , et al. High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1440-1447.

[36] Huang J, Zhang W J, You L X, et al. High speed superconducting nanowire single-photon detector with nine interleaved nanowires[J]. Superconductor Science and Technology, 2018, 31(7): 074001.

[37] Zhang W J, Huang J, Zhang C J, et al. A 16-Pixel Interleaved Superconducting Nanowire Single-Photon Detector Array With A Maximum Count Rate Exceeding 1.5 GHz[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-4.

[38] Resta G V, Stasl L, Perrenoud M, et al. Gigahertz Detection Rates and Dynamic Photon-Number Resolution with Superconducting Nanowire Arrays[J]. Nano Letters, 2023, 23(13): 6018-6026.

[39] Zhang T Z, Huang J, Zhang X Y, et al. Superconducting single-photon detector with a speed of 5 GHz and a photon number resolution of 61[J]. Photonics Research, 2024, 12(6): 1328.

[40] Chen Y A, Zhang Q, Chen T Y, et al. An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres[J]. Nature, 2023, 589: 214-219.

[41] Diamanti E, Lo H K, Qi B, et al. Practical challenges in quantum key distribution[J]. NPJ Quantum Information, 2016, 2: 16025.

[42] Sasaki, M. Quantum networks: where should we be heading?[J]. Quantum Science and Technology, 2017, 2: 020501.

[43] Li W, Zhang L K, Tan H, et al. High-rate quantum key distribution exceeding 110 Mb s^{-1}[J]. Nature Photonics, 2023, 17: 416-421.

[44] Cornwell D M . NASA's optical communications program for 2017 and beyond[C]. 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). IEEE, 2018: 10-14.

[45] 吴晓薇, 杨雷, 展月英, 等. 高速脉冲位置调制对 SNSPD 探测光子计数特性影响 (特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(07): 158-167.

[46] Shibata H, Takesue H, Honjo T, et al. Single-photon detection using magnesium diboride superconducting nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(21): 212504.

[47] Ejrnaeus 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.