中波红外 64 像元超导纳米线单光子成像器

作者

邓捷 [1,*], 万超 [2,*], 刘浩 [2], 郝浩 [1], 柳震 [1], 黄洋辉 [1], 涂学凑 [1,3], 张蜡宝 [1,3], 贾小氢 [1,3], 陈健 [1,2], 康琳 [1,3], 赵清源 [1,2,§], 吴培亨 [1,3]

[1] 南京大学电子科学与工程学院，超导电子学研究所，南京 210023

Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

[2] 紫金山实验室，江苏南京 211111

Purple Mountain Laboratories, Nanjing, Jiangsu 211111, China

[3] 合肥国家实验室，安徽合肥 230088

Hefei National Laboratory, Hefei, Anhui 230088, China

[*]共同第一作者

[§]通讯作者，E-mail: qyzhao@nju.edu.cn

录用稿件，非最终出版稿

摘要

本文设计并制备了一种基于非晶钨硅(WSi_x)超导薄膜的 64 像元中波红外超导纳米线单光子探测器(SNSPD)阵列。器件采用 2-SNAP 探测单元与超导延迟线时空编码相结合的阵列架构，仅利用两路高速读出通道实现 64 个像元单光子事件的空间位置解析与时间信息获取，并通过微波阻抗匹配结构优化探测单元与延迟线之间的信号传输特性，提高读出信号的传输效率和信噪比。在 2.25 K 工作温度下，器件完成了 64 像元时空分辨性能测试，实现了清晰的像元时间编码分辨。相邻像元时间间隔为 47.2 ps，平均时间峰半高宽为 25.6 ps，单光子探测时间抖动为 162.5 ps，具有良好的像元响应均匀性。进一步搭建自由空间中波红外测试平台，对器件在 1.55–3.75 μm 波段进行了单光子探测性能表征。结果表明，器件在 1.55–2.25 μm 波段实现饱和内量子效率，在 3.00、3.50 和 3.75 μm 波段对应内量子效率分别达到 74%、36%和 21%，验证了 WSi_x 超导纳米线实现中波红外单光子探测的可行性。最后，利用该器件完成了 3.75 μm 波段下 480 ℃高温目标的单光子被动热成像实验，成功恢复了目标 几何轮廓及热辐射分布特征。研究结果表明，该 64 像元中波红外 SNSPD 阵列兼具时空分辨能力和中波红外单光子探测能力，为中波红外单光子成像、热辐射探测以及高灵敏红外成像等应用提供了新的技术方案。

关键词

超导纳米线单光子探测器；中波红外；阵列探测器；单光子成像。

录用稿件，非最终出版稿

引言

超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single-Photon Detector，SNSPD)凭借高探测效率、低暗计数率、低时间抖动以及宽光谱响应范围等优异性能，已成为目前性能最先进的单光子探测技术之一[1-3]。得益于其优异的性能表现，SNSPD 已广泛应用于量子通信、量子计算、深空光通信以及生物医学成像等领域[4-7]。随着超导材料体系和器件制备工艺的不断发展，SNSPD 已实现超过 98%的系统探测效率、低于 3 ps 的时间抖动以及低至每天不足 1 个计数的暗计数水平[8-10]，同时其工作波长范围已逐步从紫外波段拓展至中红外波段，展现出在弱光探测领域广阔的应用前景。

随着 SNSPD 响应波长不断向中红外波段拓展，其中波红外单光子探测技术受到越来越多的关注。中波红外(Mid-wave Infrared，MWIR)波段通常覆盖 3–5 μm 范围[11,12]，包含丰富的分子振动跃迁信息和目标热辐射特征，在天文观测、环境监测、生物光谱分析以及红外成像等领域具有重要应用价值[13-15]。特别是在天文探测领域，中波红外单光子探测技术能够显著提升极弱光目标的探测灵敏度，为系外行星大气光谱分析和宇宙背景辐射观测提供新的技术途径。目前，中波红外探测主要依赖碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride，HgCdTe)和阻挡杂质带(Blocked Impurity Band，BIB)探测器[16,17]。尽管这类探测器能够工作于 4–10 K 温区，但其噪声水平较高，难以满足单光子探测需求，同时还存在响应漂移和稳定性不足等问题，限制了其在超弱光探测领域的应用。相比之下，SNSPD 具有低噪声、高计数速率以及优异的时间分辨能力等优势，在中波红外单光子探测领域展现出独特潜力[2,3,18]。

然而，实现 SNSPD 在中波红外波段的高效单光子探测仍面临诸多挑战。随着探测波长的增加，单个光子的能量显著降低，光子吸收后产生的热激发区域尺寸减小，使超导纳米线发生电阻态转变的概率降低，从而限制器件的内量子效率[19]。为了实现高性能的中波红外单光子探

录用稿件，非最终出版稿

测，需要降低超导材料的能隙并优化其电子输运特性[20]。近年来，非晶 WSi_x 材料因具有较低的超导能隙、优异的薄膜均匀性以及良好的中波红外光子响应能力[18]，成为中波红外 SNSPD 的重要候选材料。研究表明，采用低临界温度、高电阻率超薄 WSi_x 薄膜制备的超导纳米线，不仅能够在中波红外波段实现优异的探测性能，同时已在 7.4–29 μm 宽波段范围内实现饱和内部量子效率，为宽光谱红外单光子探测提供了重要材料基础[21,22]。与此同时，中波红外 SNSPD 系统应用也取得了重要进展，在器件性能方面，2 μm 波段的 SNSPD 系统探测效率已超过 90%[23]；在应用方面，已分别实现工作于 2.3 μm 和 3.5 μm 波段的单像素扫描激光雷达(Light Detection and Ranging，LiDAR)系统，这些进一步验证了 SNSPD 在中波红外主动成像与三维探测中的应用潜力[24,25]。

目前，中波红外 SNSPD 的研究仍主要集中于单像元器件层面，难以满足大视场、高空间分辨率和高速单光子成像等应用需求。相比于单像元探测，大规模 SNSPD 阵列能够通过多像元协同探测实现光子事件的空间定位与时间信息记录，是实现中波红外单光子成像的重要基础。近年来，研究人员提出了行列读出、热耦合读出以及时空编码读出等多种阵列架构[26-28]，并实现了数数百像元乃至数十万像元规模的 SNSPD 阵列[29]。然而，目前这些大规模阵列主要工作于可见光和近红外波段，中波红外阵列 SNSPD 的发展仍然十分有限。另一方面，随着阵列规模不断扩大，读出通道数量迅速增加，传统独立读出方式将显著提高低温互连复杂度和系统热负载。因此，亟需发展适用于中波红外波段的高集成度阵列结构与高效率复用读出技术，以满足大规模中波红外单光子成像系统的发展需求。

基于上述背景，本文设计并制备了一种基于 WSi_x 超导薄膜的 64 像元中波红外 SNSPD 阵列器件。器件采用双线并联探测结构与超导延迟线时空编码相结合的复用读出架构，实现了多像元单光子事件的位置编码与时间测量。针对中波红外阵列探测需求，本文对器件结构设计、微波传输特性以及阻抗匹配进行了优化，并完成了器件制备与实验性能表征。最后，实验验证

录用稿件，非最终出版稿

了 64 像元 SNSPD 阵列在中波红外波段的单光子探测能力，并实现了目标场景成像演示，为大规模中波红外 SNSPD 阵列器件的发展提供了新的技术方案。

器件设计与制备

为了实现中波红外波段的高灵敏度单光子探测与时空分辨成像，本文设计并制备了一种64像元超导纳米线单光子探测器(SNSPD)阵列。器件采用分立式结构设计，将探测单元与延迟线进行功能解耦，实现探测性能与微波传输性能的独立优化。图 1(a)给出了 64 像元阵列器件的整体结构示意图。该阵列由 8×8 个探测单元组成，单个探测单元的有效尺寸为 400 nm×2 μm，相邻探测单元之间的中心间距为 20 μm，因此阵列整体的占用面积约为 160 μm×160 μm。由于探测单元的有效尺寸远小于像元间距，该阵列的填充因子较低。虽然较低填充因子会降低阵列对入射光的几何覆盖率，但能够有效增加相邻像元之间的空间间隔，从而降低像元间潜在串扰。与此同时，相邻探测单元之间通过超导延迟线连接，使不同像元产生的响应脉冲具有不同的时间延迟，因此可利用输出脉冲的到达时间差实现单光子吸收位置的判定。

图 1(b)为单个探测单元及其互连结构的局部放大示意图，其中每个探测单元采用 2-SNAP 结构[30]，由两根宽度为 100 nm、长度为 2 μm 的超导纳米线并联组成，纳米线间距为 200 nm。与传统单纳米线 SNSPD 相比，2-SNAP 结构具有更高的超流承载能力和更大的输出信号幅度，从而提高系统读出信噪比[31]。为实现多像元的空间位置编码，相邻探测单元之间采用超导延迟线进行连接[32]。延迟线宽度设计为 400 nm，长度为 150 μm，可产生约 47.3 ps 的传播时间延迟。通过测量探测器两端输出脉冲的到达时间差，可以确定单光子在阵列中的吸收位置。需要指出的是，基于探测单元间距进行位置编码的阵列结构虽然能够降低相邻像元之间的串扰并提高时域位置分辨能力，但较低的填充因子也会限制阵列的光子收集效率。针对这一问题，后续可通过集成微透镜[33]、光学天线[34]等光耦合结构，将更大范围内的入射光有效聚焦或耦合至探

录用稿件，非最终出版稿

测单元，从而在保持像元间空间隔离特性和时间编码能力的同时，提高阵列的有效光学填充因子。

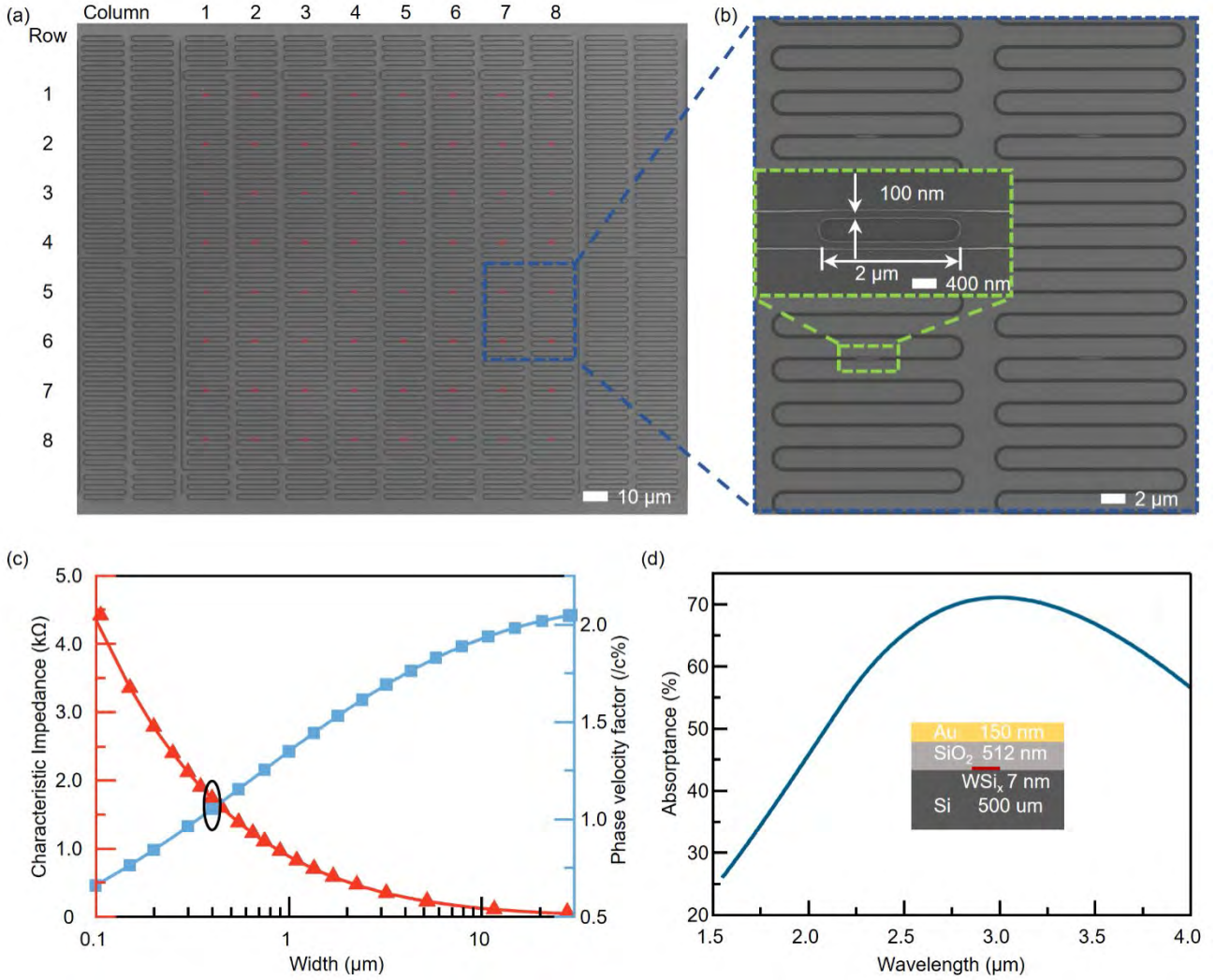


图 1 **(a)** 64 像元的 SNSPD 的扫描电子显微镜(SEM)图像。探测器位置用红色进行标记；**(b)** 局部放大的 SEM 图像和单个像素的 SEM 图像；**(c)**不同宽度纳米线的特征阻抗和相速度的仿真结果；**(d)** 器件光学堆栈结构的光学吸收率仿真结果。

Fig. 1. (a) Scanning electron microscopy (SEM) image of the 64-pixel SNSPD array. The detector position is marked in red. **(b)** Magnified SEM image of the array and SEM image of a single pixel. **(c)** Simulated characteristic impedance and phase velocity as functions of the nanowire width. **(d)** Simulated absorptance of the device optical stack.

图 1(c)给出了不同宽度纳米线对应的特征阻抗和相速度仿真结果。100 nm 宽纳米线主要

用于光子探测，其特征阻抗约为 4.3 kΩ；而 400 nm 宽延迟线的特征阻抗约为 1.75 kΩ[35]。由于两者存在明显阻抗失配，直接连接将导致较大的信号反射，从而降低系统读出效率。为此，本文采用 2-SNAP 并联结构降低探测单元的等效阻抗，并结合微带线(Microstrip，MS)结构进行优化设计。当两根 100 nm 纳米线间距为 200 nm、SiO_2介质层厚度为 295 nm 时，仿真结构如图 1(d)所示，在 10 GHz 以内，单个探测器—延迟线单元的传输损耗均低于−0.015 dB，表明该结构实现了良好的阻抗匹配。此外，分立式结构还能够有效降低像元之间的电学串扰和光学串扰，为大规模阵列扩展提供了可行方案。

器件采用磁控共溅射工艺在高阻硅衬底上沉积厚度约为 7 nm 的非晶 WSi_x 超导薄膜。为防止薄膜氧化，在其表面原位沉积 5 nm 厚的 Si 保护层。测得 WSi_x 薄膜方块电阻($R_{\square}$)为 217 Ω，超导临界温度 T_C 约为 4.5 K。器件图形采用 100 kV 电子束曝光系统加工，以聚氢倍半硅氧烷(hydrogen silsesquioxane，HSQ)负性电子束光刻胶作为抗蚀剂完成图形化。综合考虑加工效率与曝光精度，探测器及延迟线区域采用 0.2 nA 电子束流曝光，而阻抗匹配渐变线采用 2 nA 电子束电流进行曝光。为避免不同曝光电流切换引起的拼接误差，在延迟线与渐变线连接处设计了重叠结构(overlapping structure)。实验结果表明，该结构不会对器件微波传输特性产生明显影响。随后，采用反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching，RIE)工艺，在 CF_4 气氛下以 50 W 射频功率刻蚀 71 s，实现器件图形向 WSi_x 薄膜的转移。最后，通过电子束蒸镀和磁控溅射工艺分别制备微带线结构中的 SiO_2 介质层和 Au 金属接地层，完成器件制备，其结构示意图如图 1(d)所示。其中，光学腔由 512 nm 厚的二氧化硅(SiO_2)和 150 nm 厚的金(Au)反射镜构成，仿真结果表明，该结构在 3.0 μm 波段的吸收率峰值达到 71%。该结果对应光学堆栈结构中 WSi_x 薄膜的局部光学吸收特性，并未考虑实际 64 像元阵列的像元间距、纳米线几何结构及有限填充因子，因此该吸收率不能直接等同于实际阵列的整体光子收集效率或器件探测效率。

录用稿件，非最终出版稿

器件时空性能表征

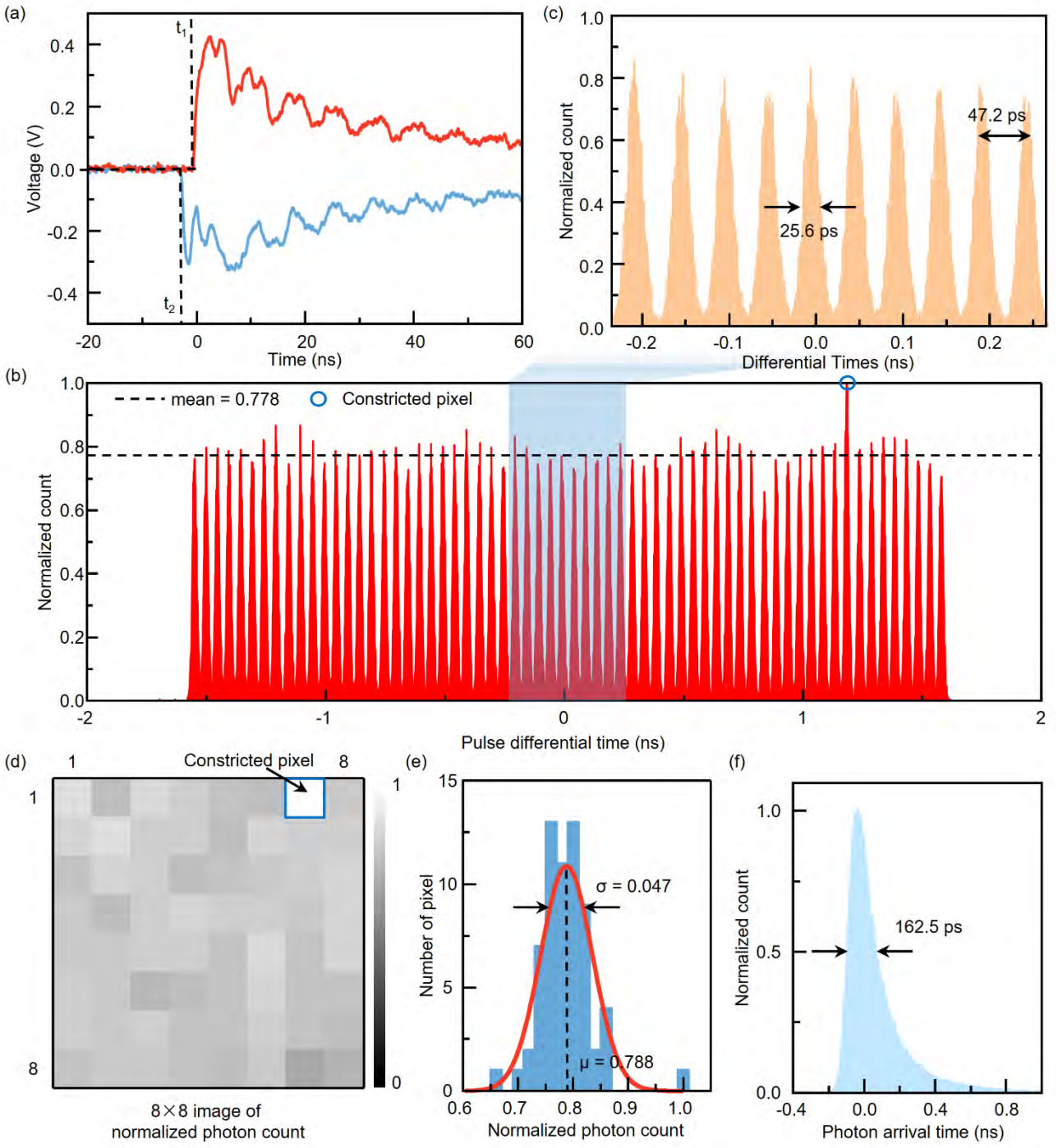


图 2 SNSPD 的时空探测基本性能。**(a)**器件两端的输出波形;**(b)**时间差的一维分布;**(c)**局部放大图;**(d)**归一化光子计数的二维图;**(e)**所有 64 个像素的光子计数统计;**(f)**光子到达时间统计分布,时间抖动的半峰全宽为 162.5 ps。

Fig. 2. Basic spatiotemporal detection performance of the SNSPD. **(a)** Output pulse waveforms from the two ends of

the device; **(b)** One-dimensional distribution of the time difference; **(c)** Magnified view of the time-difference distribution; **(d)** Two-dimensional map of the normalized photon counts; **(e)** Photon count statistics of all 64 pixels; **(f)** Statistical distribution of the photon arrival time, with a full width at half maximum (FWHM) timing jitter of 162.5 ps.

器件时空分辨性能测试在 2.25 K 低温环境下进行。在该温度下，所制备 SNSPD 的开关电流(I_{SW})为 3.96 μA。实验中采用飞秒光纤激光器(Calmar Laser FPL-02CFF)作为光源，其工作波长为 1550 nm，重复频率为 20 MHz。该飞秒脉冲光源用于提供明确的时间参考，以表征 64 像元阵列的时间响应、时间抖动以及基于超导延迟线的时空编码和像元位置解析能力。需要说明的是，阵列的位置解析能力由延迟线结构及信号传播时间差决定，与入射光波长无直接关系。

SNSPD 采用单端偏置电流驱动，并输出一对由光子探测事件触发的电脉冲。每次光子吸收事件将在纳米线中产生一对极性相反的电脉冲，并沿纳米线向两个相反方向传播。图 2(a)给出了两个输出端的脉冲波形，同时展示了接入低温放大器(CITLF1) 后的输出波形作为对比。由于两个脉冲的传播距离与光子吸收位置相关，因此其到达时间差(t_1-t_2)可用于确定响应像元的位置[26]。

本文将死时间(dead time)定义为脉冲上升沿起始时刻至脉冲幅值衰减至峰值 1/e 所对应的时间间隔。该时间实际上对应于纳米线电流恢复过程中的时间常数τ。根据经验公式 1/(3τ)，估算得到器件最大计数率约为 6.9 MHz。实验中采用高速实时示波器记录两个输出端脉冲的到达时间t_1和t_2。基于脉冲在传输线路中的传播模型，光子吸收位置可表示为：

$$x = \frac{v_p(t_2 - t_1) + L}{2} \tag{1}$$

而光子的到达时间可表示为：

$$t_p = \frac{t_1 + t_2 - L/v_p}{2} \tag{2}$$

其中，L为 SNSPD 延迟线的总长度，v_p为延迟线中的相速度(phase velocity)。通过同时测量两

录用稿件，非最终出版稿

个端口的脉冲到达时间，不仅能够重建光子的到达时刻，还能够定位其在探测器中的吸收位置，从而实现单光子的时空分辨探测。

图 2(b)、(c)分别给出了基于时间差的一维光子计数直方图，其中差分时间定义为：

$$\Delta t = \frac{t_2 - t_1}{2} \tag{3}$$

其结果显示出 64 个彼此完全分离的高斯峰，平均半峰全宽(FWHM)为 25.6 ps，相邻峰之间的平均时间间隔为 47.2 ps。由于相邻像元之间的延迟线长度为 150 μm，因此可计算得到信号在延迟线中的传播速度为 3.27 μm/ps(约为真空光速的 1.09%)，这一结果与理论设计值相一致。通过将时间差转换为像素位置，可重构得到器件的二维响应分布，如图 2(d)所示。从二维归一化响应分布可以看出，除 1 个像素(图 2(d)中蓝色框)外，整个阵列器件均表现出较好的响应均匀性。

为了进一步评估器件的像元均匀性，对所有像元的归一化计数值进行了统计分析,结果如图 2(e)所示。可以看到,统计结果呈现高斯分布,其均值 μ=0.778,标准差 σ=0.047,表面器件具有良好的像元一致性和响应均匀性。如图 2(f)所示,光子相对于同步脉冲到达时间 t_0 的统计分布用于表征器件的时间分辨性能。光子到达时间t_p的统计分布的半峰全宽定义为器件时间抖动，其测量结果为 162.5 ps。

器件量子效率表征

在完成器件基本时空分辨性能测试后，进一步对其中波红外单光子探测性能进行了表征，主要测试不同波长下的光子计数率(Photon Count Rate，PCR)曲线。为此，搭建了一套自由空间光路的中波红外测试系统，其结构如图 3(a)所示。光源采用 Thorlabs 公司生产的稳定型碳化硅光源(SLS203L)，其工作温度最高可达 1500 K，可提供稳定的自由空间黑体辐射输出光谱，覆

录用稿件，非最终出版稿

盖 0.5–9 μm 波长范围。该光源集成滤光片安装座，可根据实验需求便捷替换不同中心波长的带通滤光片，实现不同波段光子的选择性输出。

实验中使用的准直和聚焦透镜均采用氟化钙(CaF_2)材料。其中，光源端采用焦距 50 mm 的透镜实现光束准直；制冷机前采用焦距 100 mm 的透镜实现光束聚焦。为了保证光斑准确照射到器件有效探测区域，在聚焦透镜下方安装了 XYZ 三维精密位移台，通过调节位移台实现光束精确对准。制冷机光学窗口采用未镀膜 ZnSe 窗口片，其在 1550 nm–14 μm 波长范围内的平均透过率约为 70%。为降低室温黑体辐射引起的背景计数影响，在 40 K 和 4 K 热屏蔽罩上分别安装了 OD3.0(−30 dB)和 OD1.0(−10 dB)的中性密度衰减片。

本实验采用连续黑体辐射光源，并结合不同中心波长的带通滤光片进行波长选择。因此，各波长下获得的 PCR 响应严格对应于相应滤光片带宽范围内的光谱响应，而非理想单色光条件下的响应。但是考虑到所制备 SNSPD 具有较宽的光谱响应范围，且在所采用滤光片的有限带宽内内部量子效率变化相对较小，因此本文以带通滤光片的中心波长作为对应测量结果的特征波长。

录用稿件，非最终出版稿

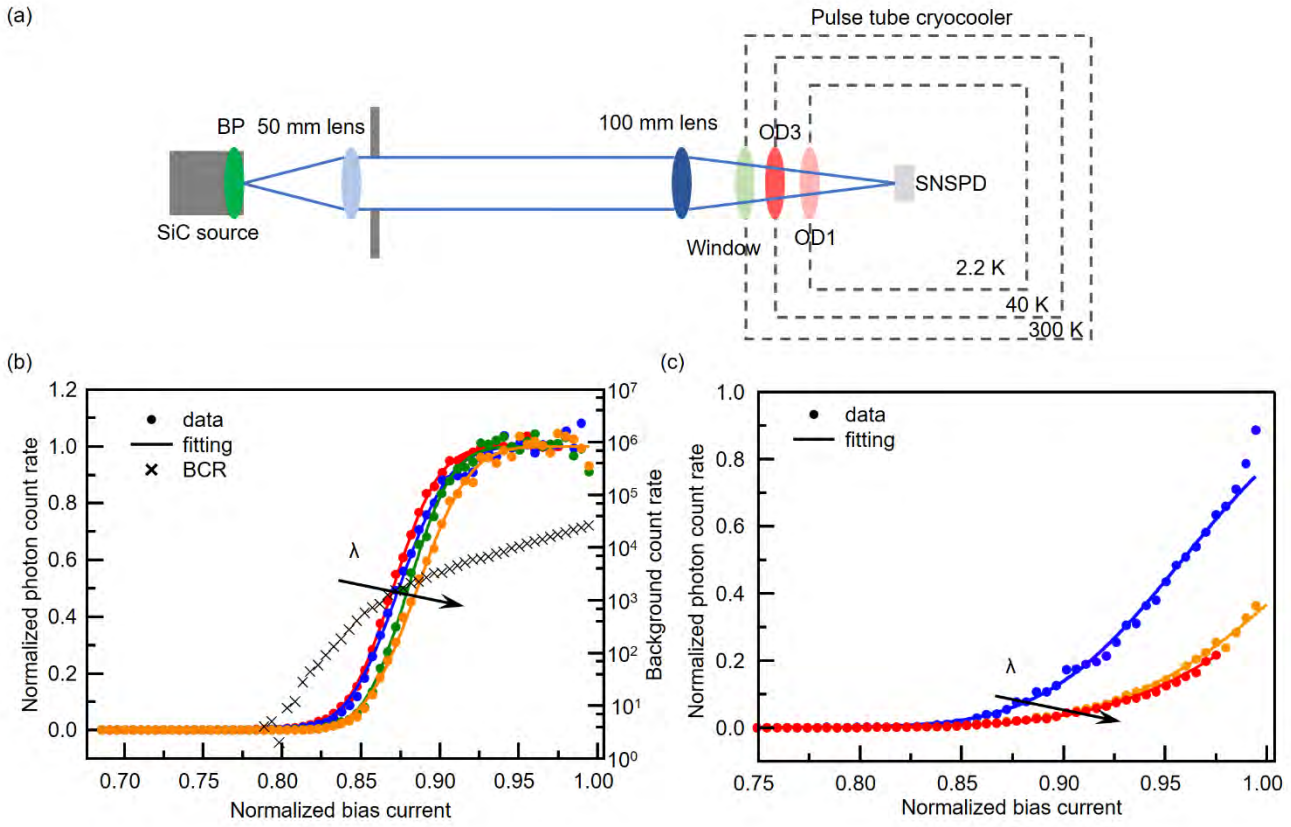


图 3 **(a)**中波红外自由空间测试系统；**(b)**1.55 μm(红),1.75 μm(蓝),2.0 μm(绿)和 2.25 μm (橙)的饱和光子计数率曲线和背景计数率曲线；**(c)**3 μm(蓝),3.5 μm(橙)和 3.75 μm(红)的不饱和光子计数率曲线。

Fig. 3. (a) Free-space mid-wave infrared (MWIR) measurement system; **(b)** Saturated photon count rate (PCR) curves and background count rate curves at wavelengths of 1.55 μm (red), 1.75 μm (blue), 2.0 μm (green), and 2.25 μm (orange); **(c)** Unsaturated photon count rate curves at wavelengths of 3.0 μm (blue), 3.5 μm (orange), and 3.75 μm (red).

背景计数率(Background Count Rate，BCR)的测量在关闭光源条件下进行。扫描偏置电流得到器件背景计数率曲线，如图 3(b)所示，其最大背景计数率约为 2.63 kcps，因此后续所有 PCR 测试结果均扣除了对应偏置电流下背景计数的贡献，以获得器件真实的光子计数率。PCR 测试过程中，根据不同探测波长分别更换带通滤波器，其中心波长分别为 1550 nm、1750 nm、2.0 μm、2.25 μm、3.0 μm、3.5 μm 和 3.75 μm，带宽均为 500 nm。为了定量提取不同波长下器件内部量子效率，采用 Fano 涨落机制的拟合模型对扣除背景计数率后的实验 PCR 曲线进行拟合[36-38]，其计算公式如下：

录用稿件，非最终出版稿

$$CR = \frac{A}{2} erfc\left(\frac{I_{\mathrm{CO}} - I_{\mathrm{B}}}{\Delta I_{\mathrm{B}}}\right) \tag{4}$$

其中CR是器件的光子计数率，A代表的是器件的最大计数率，I_{CO}表示 PCR 曲线拐点对应的偏置电流，I_{B}是偏置电流,还有ΔI_{B}表示由 Fano 涨落引起的 PCR 曲线展宽参数，通过拟合 PCR 曲线的饱和特性，可以获得不同波长下器件达到饱和探测状态所对应的内部量子效率。

由上述模型拟合可获得不同波长下 PCR 曲线的特征参数，并进一步计算器件的内部量子效率。对于 PCR 曲线已经达到饱和的平台区域，可根据拟合得到的饱和计数率确定相应波长下的内部量子效率；对于尚未达到饱和的 PCR 曲线，则采用相同模型对高偏置电流区域进行外推，以估算其饱和计数率，并进一步获得相应的内部量子效率。

表 1 1550 nm-3.75 μm 各波长对应的 Fano 波动拟合参数

Table 1. Fano fluctuation fitting parameters for wavelengths from 1550 nm to 3.75 μm

λ /μm	A /kcps	I_{CO} /μA	ΔI_B /μA
1.55	22.66	3.48	0.13
1.75	13.76	3.50	0.14
2.0	12.81	3.52	0.13
2.25	13.75	3.54	0.15
3.0	21.59	3.83	0.31
3.5	104.68	4.09	0.39
3.75	115.75	4.13	0.42

图 3(b)是 1550 nm、1750 nm、2.0 μm 和 2.25 μm 的计数率曲线，拟合结果表明，在 1550 nm、1750 nm、2.0 μm 和 2.25 μm 波段，器件内部量子效率均达到约 99%，对应的拟合参数列于表 1。该结果表明，器件在 1.55–2.25 μm 波段已达到饱和探测状态，具有较高的单光子探测

录用稿件，非最终出版稿

灵敏度。

图 3(c)给出了 3.0 μm、3.5 μm 和 3.75 μm 波段对应的 PCR 曲线。采用相同方法进行拟合发现，随着探测波长向中波红外区域延伸，器件内部量子效率逐渐降低，在 3.0 μm、3.5 μm 和 3.75 μm 波段分别估算为 74%、36%和 21%。对应拟合参数见表 1。其中，3.0 μm 处的 PCR 曲线已表现出较明显的饱和趋势，而 3.5 μm 和 3.75 μm 处的 PCR 曲线在实验可达偏置电流范围内尚未达到明显的饱和平台。因此，与 1.55–2.25 μm 波段不同，3.5 μm 和 3.75 μm 处的饱和响应无法直接由实验数据确定，而是采用在饱和波段得到验证的 Fano 模型对高偏置电流区域进行外推后获得。在拟合过程中，在 95%置信区间下对 Fano 模型中的各个参数进行拟合，并基于拟合参数及其置信区间对高偏置电流区域进行外推，以评估模型拟合及外推结果的不确定性。3.5 μm 和 3.75 μm 处拟合得到的特征电流 I_{CO}分别为 4.09 μA 和 4.13 μA，均高于器件实测开关电流 3.96 μA。因此，3.5 μm 和 3.75 μm 处得到的 36%和 21%内部量子效率是基于 Fano 模型外推得到的估算结果，而非实验直接测得的饱和内部量子效率。

该现象主要源于中波红外的光子能量降低，使单个光子在超导纳米线中产生的准粒子数量减少，导致光子诱导的热岛尺寸减小，从而降低了触发超导态转变的概率。除此之外，WSi_x 薄膜自身的材料参数(如超导能隙、电子扩散系数以及电子-声子相互作用强度等)同样会影响长波光子的探测性能。其中，薄膜沉积过程中元素组分的调控可能引起超导参数和电子输运特性的改变，进而影响器件在长波红外波段的响应能力。

综合上述结果，该器件在 1.55–2.25 μm 波段实现了饱和的内部量子效率响应，并在 3.75 μm 波段获得了基于 Fano 模型外推估算的 21%内部量子效率，表明所制备基于 WSi_x 薄膜的 SNSPD 具备向中波红外波段拓展的单光子探测能力。该结果为后续开展基于热辐射光子的中波红外单光子成像实验提供了器件基础。

尽管本文设计并制备了增强中波红外吸收的光学腔结构，但目前尚未对器件的系统探测效

录用稿件，非最终出版稿

率进行定量测量。其主要原因在于，中波红外波段入射光子数的精确标定仍具有一定难度，同时低温环境下缺少针对该波段优化设计的高效率光学耦合组件，使得入射光功率、光斑分布以及器件有效探测区域之间难以实现高精度匹配和标定。因此，本文通过内部量子效率表征器件的本征光子探测能力，随后结合实际热辐射光子的被动单光子热成像实验，进一步验证器件在中波红外弱光探测及成像应用中的实际性能。

被动单光子成像演示实验

为了进一步验证器件在中波红外波段的实际应用能力，采用 3.75 μm 波长对器件进行了热成像性能测试。不同于主动红外成像依赖外部光源对目标进行照明，被动红外成像无需额外光源，而是直接探测目标自身热辐射产生的红外光子信息，实现对目标温度分布的重构。根据黑体辐射理论[39]，温度高于绝对零度的物体均会向外辐射红外电磁波，其辐射光谱满足普朗克分布。根据维恩位移定律，辐射峰值波长位于 3.75 μm 附近时，对应物体温度约为 500 ℃。实验中采用加热至 480 ℃的烙铁作为热辐射目标，其理论辐射峰值波长约为 3.85 μm，与实验探测波长基本匹配。

高温目标产生的红外辐射光子向空间传播，经光学收集后进入单光子扫描成像系统。实验中，通过调节可变光阑孔径对入射光束进行空间限制，实现目标区域的逐点光信号采集；同时，通过调节光阑位置控制入射光束传播方向，使其以固定高度垂直入射至扫描系统。经过光阑后的红外辐射光进入扫描振镜(scanning galvanometer)，经聚焦物镜空间汇聚后，通过中波红外光学窗口以及 3.75 μm 窄带滤光片入射至制冷机内部 SNSPD 探测器表面。探测器输出电脉冲信号由计数器进行采集，并记录对应空间位置的光子计数信息。通过扫描振镜程序控制，实现对探测区域的二维扫描，并根据不同空间位置的光子计数率重建目标热辐射分布图像[40,41]。受当前自由空间光学系统聚焦能力和光斑匹配条件的限制，入射光斑尚未能够在低温探测器平面实

录用稿件，非最终出版稿

现与 64 个像元的有效空间匹配，因此本实验采用扫描振镜实现目标的空间扫描，64 像元阵列主要用于中波红外光子探测与计数，其并行空间采样能力尚未得到充分利用。

如图 4(a)–(c)内的红色圆圈所示，搭建的中波红外单光子扫描成像系统分别对扁头烙铁正放、扁头烙铁侧放以及尖头烙铁进行了热成像测试。实验前，将两个目标分别加热至 480 ℃，待温度稳定后进行数据采集。由于目标不同区域存在温度梯度，其对应的 3.75 μm 波段热辐射强度存在差异，从而导致探测器输出光子计数率的空间变化。

图 4(d)–(f)给出了基于 SNSPD 探测结果重建得到的热成像图像。通过对图像进行归一化处理以及等温线分析，可以提取目标高温区域分布及整体几何轮廓信息。实验结果表明，该系统能够清晰恢复不同形态烙铁目标的空间结构，并能够通过光子计数分布观察目标中心区域与边缘区域的辐射差异。上述结果验证了所制备 SNSPD 器件在 3.75 μm 中波红外波段对热辐射光子的探测能力，同时展示了基于 SNSPD 的被动式单光子红外成像技术在弱红外辐射探测领域的应用潜力。

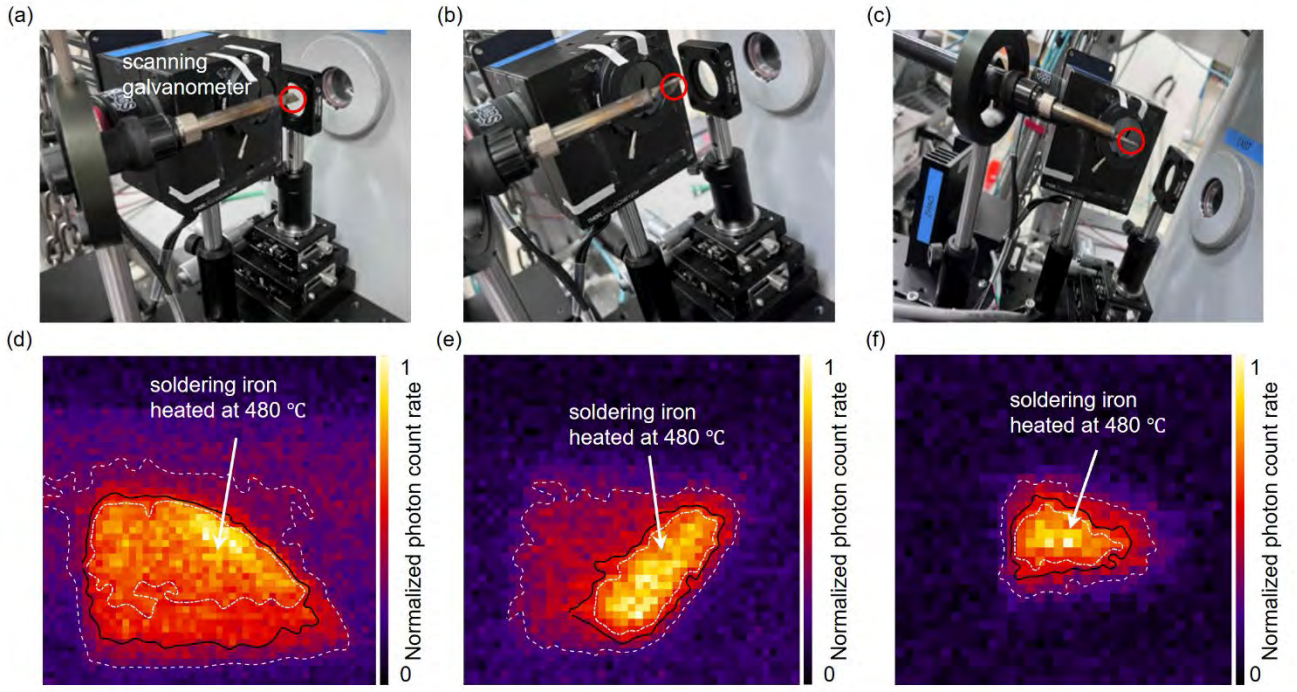


图 4 被动单光子成像演示实验结果。(a)扁头烙铁正放实物图；(b)扁头烙铁侧放实物图；(c)尖头烙铁实物图；

(d)扁头烙铁正放成像结果；(e)扁头烙铁侧放成像结果；(f) 尖头烙铁成像结果。

Fig. 4. Experimental results of passive single-photon imaging demonstration. **(a)** Photograph of the flat-tip soldering iron placed horizontally; **(b)** Photograph of the flat-tip soldering iron placed laterally; **(c)** Photograph of the pointed-tip soldering iron; **(d)** Imaging result of the flat-tip soldering iron in the horizontal position; **(e)** Imaging result of the flat-tip soldering iron in the lateral position; **(f)** Imaging result of the pointed-tip soldering iron.

结论

本文设计并制备了一种基于 WSi_x 超导薄膜的 64 像元中波红外超导纳米线单光子探测器(SNSPD)阵列，并系统研究了器件的时空分辨性能、中波红外单光子探测能力以及被动式单光子成像能力。通过结合 2-SNAP 探测结构与超导延迟线时空编码读出方案，实现了 64 像元单光子事件的位置解析，仅利用一对高速读出通道即可完成多像元信号解码，有效降低了大规模阵列系统的读出复杂度和低温互连负载。实验结果表明，器件相邻像元时间间隔为 47.2 ps，相邻峰重叠面积小于 1%，时间抖动达到 162.5 ps，同时表现出良好的像元一致性和稳定的时空分辨能力。

进一步搭建了自由空间中波红外单光子测试系统，对器件在 1.55–3.75 μm 波段的单光子探测性能进行了系统表征。实验结果显示，器件在 1.55–2.25 μm 波段实现了饱和内部量子效率，在 3.00、3.50 和 3.75 μm 波段仍分别获得 74%、36%和 21%的内部量子效率，验证了基于 WSi_x 薄膜的 SNSPD 具有向中波红外波段拓展的单光子探测能力。在此基础上，利用 3.75 μm 窄带滤光片和扫描成像系统，进一步开展了被动式中波红外单光子成像实验。通过探测 480 ℃高温目标自身热辐射产生的红外光子，成功重建了目标空间轮廓及热辐射分布信息，验证了该器件在中波红外弱光热辐射探测与单光子成像中的应用能力。

综上所述，本工作实现了 64 像元中波红外 SNSPD 阵列的设计、制备及性能验证，证明了

录用稿件，非最终出版稿

基于 WSi_x 超导纳米线与时空编码读出架构实现中波红外单光子阵列探测的可行性。当前被动单光子成像实验中的空间扫描主要由扫描振镜完成，64 像元阵列的并行空间采样能力尚未得到充分利用，主要受低温光学系统聚焦能力、光斑尺寸及其与阵列像元空间匹配的限制。未来可通过优化 WSi_x薄膜材料与纳米线结构、改进低温光学聚焦与光子耦合、降低背景光子噪声，并提高阵列填充因子，有望进一步提升中波红外单光子探测效率和光子收集效率，充分发挥阵列的并行空间采样与时空编码能力。随着探测效率、光学耦合效率和阵列规模的进一步提升，该技术有望应用于高灵敏中波红外单光子成像、天文观测、红外光谱分析以及弱光热辐射探测等领域[42]。

致谢

感谢南京大学超电子学研究所的其他成员在纳米加工、器件测试以及仪器设备使用等方面给予的帮助。同时，感谢在本项目开展过程中给予我们专业意见和讨论的各位同事与朋友。本工作得到量子科学与技术—国家科技重大专项(项目编号：2025ZD0300300)、国家自然科学基金(项目编号：62325105、62227820、624B2062)、江苏省自然科学基金(项目编号：BK20230020)、国家重点研发计划(项目编号：2022YFF0712800)、江苏省电磁波先进调控技术重点实验室以及教育部极端性能光电器件与系统重点实验室的支持。

参考文献

[1] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardanov A, Williams C, Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 705.

[2] Hadfield R H 2009 *Nat. Photonics* **3** 696

录用稿件，非最终出版稿

[3] Marsili F, Verma V B, Stern J A, Harrington S, Lita A E, Gerrits T, Vayshenker I, Baek B, Shaw M D, Mirin R P, Nam S W 2013 *Nat. Photonics* **7** 210.

[4] Grünenfelder F, Boaron A, Resta G V, Perrenoud M, Rusca D, Barreiro C, Houlmann R, Sax R, Stasi L, El-Khoury S, Hänggi E, Bosshard N, Bussières F, Zbinden H 2023 *Nat. Photonics* **17** 422.

[5] Wollman E E, Allmaras J P, Beyer A D, Korzh B, Runyan M C, Narváez L, Farr W H, Marsili F, Briggs R M, Miles G J, Shaw M D 2024 *Opt. Express* **32** 48185.

[6] Chang J, Los J W N, Tenorio-Pearl J O, Noordzij N, Gourgues R, Guardiani A, Zichi J R, Pereira S F, Urbach H P, Zwiller V, Dorenbos S N, Esmaeil Zadeh I 2021 *APL Photonics* **6** 036114.

[7] Baudis L, Bismark A, Brugger N, Capelli C, Charaev I, Cuenca García J, Hadas G D, Hochberg Y, Hohmann J K, Kavner A, Koos C, Kuzmin A, Lehmann B V, Nägeli S, Neupert T, Penning B, Ramírez García D, Schilling A 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 081002.

[8] Reddy D V, Nerem R R, Nam S W, Mirin R P, Verma V B 2020 *Optica* **7** 1649.

[9] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, Frasca S, Autry T M, Bersin E A, Beyer A D, Briggs R M, Bumble B, Colangelo M, Crouch G M, Dane A E, Gerrits T, Lita A E, Marsili F, Moody G, Peña C, Ramirez E, Rezac J D, Sinclair N, Stevens M J, Velasco A E, Verma V B, Wollman E E, Berggren K K 2020 *Nat. Photonics* **14** 250.

[10] Shibata H, Shimizu K, Takesue H, Tokura Y 2015 *Opt. Lett.* **40** 3428.

[11] Hadfield R H, Leach J, Fleming F, Paul D J, Tan C H, Ng J S, Henderson R K, Buller G S 2023 *Optica* **10** 1124

[12] Dello R S, Elefante A, Dequal D, Pallotti D K, Santamaria Amato L, Sgobba F, Siciliani de Cumis M 2022 *Photonics* **9** 470

[13] Rogalski A 2010 Infrared Detectors, 2nd ed. (Boca Raton: CRC Press)

[14] Lau J A, Choudhury A, Chen L, Schwarzer D, Verma V B, Wodtke A M 2020 *Science* **367** 175

[15] Lau J A, Chen L, Choudhury A, Schwarzer D, Verma V B, Wodtke A M 2021 *Nature* **589** 391

[16] Rogalski A 2010 *Infrared Detectors*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL.

[17] Reine M B 2001 Proc. SPIE 4288 San Jose, CA, 2001 266.

[18] Verma V B, Korzh B, Walter A B, Lita A E, Briggs R M, Colangelo M, Zhai Y, Wollman E E, Beyer A D, Allmaras J P, Vora H, Zhu D, Schmidt E, Kozorezov A G, Berggren K K, Mirin R P, Nam S W, Shaw M D 2021 *APL Photonics* **6** 056101.

[19] Pan Y, Zhou H, Zhang X, Yu H, Zhang L, Si M, Li H, You L, Wang Z 2022 *Opt. Express* **30** 40044.

录用稿件，非最终出版稿

[20] Qin Z, Bao H, Xu T, Chen S, Yang S, Li H, Wang Z, Tu X, Zhang L, Zhao Q, Jia X, Zhu G, Kang L, Chen J, Wu P 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** 024046.

[21] Colangelo M, Walter A B, Korzh B A, Schmidt E, Bumble B, Lita A E, Beyer A D, Allmaras J P, Briggs R M, Kozorezov A G, Wollman E E, Shaw M D, Berggren K K 2022 *Nano Lett.* **22** 5667–5673.

[22] Taylor G G, Walter A B, Korzh B, Bumble B, Patel S R, Allmaras J P, Beyer A D, O'Brient R, Shaw M D, Wollman E E 2023 *Optica* **10** 1672.

[23] Wan Z, Huang J, Xu G Z, Ding Y, Liu X Y, Pan Y M, Xu H X, Li H, You L X 2026 *Chin. Phys. B* **35** 018501.

[24] Taylor G G, Morozov D, Gemmell N R, Erotokritou K, Miki S, Terai H, Hadfield R H 2019 *Opt. Express* **27** 38147.

[25] Kuznesof D, Amer N, Taylor G G, Patel S R, Bumble B, Craiciu I, Choudhary N, Choi B, Morozov D V, Korzh B, Shaw M D, Wollman E E, Chong Y, Hadfield R H 2025 *Opt. Express* **33** 45684.

[26] Zhao Q Y, Dane A E, McCaughan A N, Valente D, Toomey E, Kim C, Sun S Z, Melloch M R, Berggren K K 2017 *Nat. Photonics* **11** 247

[27] Baghdadi R, Allmaras J P, Butters B A, Dane A E, Iqbal S, McCaughan A N, Toomey E A, Zhao Q Y, Kozorezov A G, Berggren K K 2020 *Phys. Rev. Appl.* **14** 054011

[28] Cheng R, Zhou Y, Wang S, Shen M, Taher T, Tang H X 2023 *Nat. Photonics* **17** 112

[29] Oripov B G, Rampini D S, Allmaras J, Shaw M D, Nam S W, Korzh B, McCaughan A N 2023 *Nature* **622** 730

[30] Ejrnaes M, Casaburi A, Quaranta O, Marchetti S, Gaggero A, Mattioli F, Leoni R, Pagano S, Cristiano R 2009 *Supercond. Sci. Technol.* **22** 055006

[31] Najafi F, Marsili F, Dauler E, Molnar R J, Berggren K K 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 151101

[32] Zhao Q Y, Zhu D, Calandri N, Dane A E, McCaughan A N, Bellei F, Wang H Z, Santavicca D F, Berggren K K 2017 *Nat. Photonics* **11** 247

[33] Heath R M, Tanner M G, Drysdale T D, Miki S, Giannini V, Maier S A, Hadfield R H 2015 *Nano Lett.* **15** 819

[34] Xu Y, Kuzmin A, Knehr E, Blaicher M, Ilin K, Dietrich P I, Freude W, Siegel M, Koos C 2021 *Opt. Express* **29** 27708

录用稿件，非最终出版稿

[35] Zhu D, Colangelo M, Korzh B A, Zhao Q Y, Frasca S, Dane A E, Velasco A E, Beyer A D, Allmaras J P, Ramirez E, Strickland W J, Santavicca D F, Shaw M D, Berggren K K 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 042601

[36] Kozorezov A G, Lambert C, Marsili F, Stevens M J, Verma V B, Allmaras J P, Shaw M D, Mirin R P, Nam S W 2017 *Phys. Rev. B* **96** 054507

[37] Renema J J, Frucci G, Zhou Z, Mattioli F, Gaggero A, Leoni R, De Dood M J A, Fiore A, Van Exter M P 2013 *Phys. Rev. B* **87** 174526

[38] Bulaevskii L N, Graf M J, Batista C D, Kogan V G 2011 *Phys. Rev. B* **83** 144526

[39] P Planck M 1914 The Theory of Heat Radiation (Philadelphia: Blakiston's Son & Co.)

[40] Hudson R D 1969 Infrared System Engineering (New York: Wiley)

[41] Ru S Y, Hao H, Zhao Q Y, Li Z J, Liu H, Liu Z, Deng J, Huang Y H, Yang F, Liu N T, Wan C, Tu X C, Zhang L B, Jia X Q, Chen J, Kang L, Wu P H 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2400483

[42] Chen L, Schwarzer D, Verma V B, Stevens M J, Marsili F, Mirin R P, Nam S W, Wodtke A M 2017 *Acc. Chem. Res.* **50** 1400

录用稿件，非最终出版稿

Abstract

Superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs) have emerged as a leading technology for single-photon detection owing to their high sensitivity, low dark-count rate, and excellent temporal resolution. Extending SNSPDs from single-pixel devices to scalable detector arrays is essential for spatially resolved single-photon detection and imaging applications. However, the development of large-scale mid-wave infrared (MWIR) SNSPD arrays remains challenging because of the reduced photon energy at longer wavelengths, the limited intrinsic detection efficiency of superconducting nanowires, and the increasing complexity of cryogenic multi-channel readout. In this work, we design and fabricate a 64-pixel MWIR SNSPD array based on an amorphous tungsten silicide (WSi_x) superconducting thin film. The array adopts a compact architecture that integrates two-wire superconducting nanowire avalanche photodetector (2-SNAP) units with superconducting delay-line-based spatiotemporal encoding, enabling the spatial localization and temporal identification of photon detection events with only two high-speed readout channels. The detector and delay-line structures are separately optimized, while a microstrip-based impedance-matching structure is introduced to improve microwave signal transmission and suppress signal reflection between the detector units and delay lines. The characteristic impedance and propagation characteristics of nanowires with different widths are considered to ensure reliable temporal encoding and signal readout.

At an operating temperature of 2.25 K, the fabricated array is experimentally characterized using pulsed optical excitation, and distinct temporal peaks corresponding to the 64 pixels are obtained. The average temporal separation between adjacent pixels is 47.2 ps, and the average full width at half maximum (FWHM) of the temporal peaks is 25.6 ps, demonstrating clear pixel-to-pixel temporal discrimination. The measured single-photon timing jitter is 162.5 ps, while the reconstructed photon-count distribution shows good pixel-to-pixel response uniformity. These results verify the feasibility of the proposed delay-line-based spatiotemporal encoding scheme for multi-pixel photon-event localization with a substantially reduced number of readout channels.

A free-space MWIR optical measurement system is further established to characterize the photon-response characteristics of the WSi_x SNSPD array over the wavelength range of 1.55–3.75 μm. The internal quantum efficiency (IQE) reaches saturation over 1.55–2.25 μm and is estimated to be 74%,

36%, and 21% at wavelengths of 3.00, 3.50, and 3.75 μm, respectively. The wavelength-dependent response indicates that WSi_x superconducting nanowires retain appreciable single-photon response well into the MWIR spectral range. In addition, the results demonstrate that the combination of superconducting nanowires with optimized optical and microwave structures provides a practical approach for extending SNSPD operation toward longer infrared wavelengths.

To further demonstrate the capability of the detector for weak thermal-radiation sensing, passive single-photon thermal imaging is performed at a wavelength of 3.75 μm using a 480 °C soldering iron as the thermal radiation source. The thermal radiation emitted by the target is collected and spatially scanned in free space, and the corresponding photon-count-rate distribution is recorded to reconstruct the target image. The resulting photon-count image resolves the geometric features of the target, demonstrating the feasibility of passive MWIR thermal imaging based on single-photon detection.

Overall, this work demonstrates a 64-pixel WSi_x SNSPD array that integrates multi-pixel spatiotemporal photon-event encoding, MWIR single-photon detection, and passive thermal imaging within a compact two-channel readout architecture. The combination of delay-line-based spatial encoding and long-wavelength single-photon sensitivity provides a promising device architecture for reducing the cryogenic readout complexity of scalable MWIR SNSPD arrays, and establishes a foundation for applications in single-photon imaging, weak thermal-radiation detection, and high-sensitivity infrared sensing.

Keywords

Superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs)/ mid-infrared/ detector arrays/ single-photon imaging

录用稿件，非最终出版稿