

## 高综合性能超导纳米线单光子探测器\*

郝玲玲<sup>1)2)3)</sup> 杨晓燕<sup>1)2)†</sup> 张天柱<sup>1)2)3)</sup>  
肖游<sup>1)2)3)</sup> 尤立星<sup>1)2)</sup> 李浩<sup>1)2)‡</sup>

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) (中国科学院大学, 北京 100039)

(2023年3月6日收到; 2023年3月25日收到修改稿)

超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 优异的时间特性 (时间抖动和响应速度) 是其最具吸引力的优势之一, 并且已在量子通信、量子计算等领域中得到广泛应用. 然而, 由于 SNSPD 的各技术参数之间相互牵制, 使得进一步提升 SNSPD 综合性能存在技术挑战. 小光敏面 SNSPD 在时间特性上具有明显优势, 但同时存在探测效率低的突出问题. 本文为面向量子信息应用的光纤耦合探测器, 从开发实用化、产品化 SNSPD 出发, 采用批量对准、高效耦合的自对准封装结构, 围绕小光敏面自对准 SNSPD 综合性能的提升展开研究. 采用发散小、易刻蚀的 Au/SiO<sub>2</sub> 光学腔, 在提高纳米线光吸收效率的同时通过优化自对准芯片外轮廓加工精度的方式来提高自对准 SNSPD 的光耦合效率, 并完成了配套的工艺研发. 并通过小芯径光纤从器件封装角度提升耦合效率. 除此之外, 探测器的双层纳米线结构使其拥有更低的动态电感和更高的超导转变电流, 进一步优化了器件的时间特性. 实验制备的探测器在 2.2 K 温度下于 1310 nm 处达到最大效率 82%, 并且在 1200—1600 nm 波长范围内均有 65% 以上的系统探测效率, 同时表现出 40 MHz@3 dB 的计数率以及 38 ps 的时间抖动. 进一步, 利用低温放大器读出系统可得到最小 22 ps 的时间抖动. 本文研制的高综合性能超导单光子探测器, 为实用化、产品化 SNSPD 提供了重要的技术参考.

**关键词:** 超导纳米线单光子探测器, 自对准封装, 小光敏面**PACS:** 85.25.Pb, 85.60.Gz**DOI:** 10.7498/aps.72.20230326

## 1 引言

超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single photon detectors, SNSPD) 作为一种极限光信号探测器, 凭借高探测效率<sup>[1]</sup>、低噪声<sup>[2]</sup>、高响应速度<sup>[3]</sup>和低时间抖动<sup>[4]</sup>的优势, 在一众单光子探测器中崭露头角, 广泛应用于深空通信<sup>[5]</sup>、光量子计算<sup>[6]</sup>、单光子激光雷达<sup>[7]</sup>等前沿技术中,

并逐步向实用化、产品化迈进.

SNSPD 的时间特性, 即响应速度和时间抖动, 是其最具吸引力的优势之一. 但在实际应用中, 往往需要探测器具有优异的综合性能, 即同时满足两个或两个以上的参数要求<sup>[8]</sup>. 如在高速量子密钥分发实验中, 为实现更高的实时成码率, 在系统的接收端需要探测器兼顾高探测效率、低暗计数、高响应速度和低时间抖动. 又如在量子计算的玻色采样环节, 多光子玻色采样符合计数与探测器的探测效

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61971408, 61827823, 12033007)、上海市青年科技启明星项目 (批准号: 20QA1410900) 和中国科学院青年创新促进会项目 (批准号: 2020241) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [yxy@mail.sim.ac.cn](mailto:yxy@mail.sim.ac.cn)

‡ 通信作者. E-mail: [lihao@mail.sim.ac.cn](mailto:lihao@mail.sim.ac.cn)

率和响应速度直接相关, 进而影响了采样时间. 然而, 以往的结果往往只面向单一指标进行了优化. 目前, 兼顾 SNSPD 时间特性和探测效率的方式大体上分为两种. 一种方式围绕读出电路等外部因素展开, 如通过改善电脉冲的读出来提高器件最大计数率, 降低时间抖动<sup>[9]</sup>. 如 Calandri 等<sup>[10]</sup> 就曾利用差分双端读出电路减小探测器时间抖动. 另一种方式则是从探测器内部入手, 通过改变超导薄膜内禀属性、调整纳米线几何参数等手段完成. 然而各内部参数之间存在相互制约的关系<sup>[11,12]</sup>, 所以这一方式一直存在技术挑战.

SNSPD 依靠超导纳米线吸收输入的单光子能量拆散库珀对, 并在宽度方向上形成局域有阻热点实现对微弱光的探测<sup>[13,14]</sup>. 在有阻区形成再弛豫掉的过程中, 其能够快速地在电路中输出一个电压脉冲, 使得光子转变为电信号并实现持续可测<sup>[15,16]</sup>. 因此为提高纳米线接收光子的概率, 主流 SNSPD 均采用蜿蜒回形结构. 线长较短的小光敏面 SNSPD 在时间特性上具有显著优势, 这是因为纳米线的动态电感与线长成正比, 而动态电感会对探测器的输出光响应脉冲带来直接影响. 根据 SNSPD 响应电路模型<sup>[17]</sup>, 脉冲上升沿时间  $\tau_{\text{rise}}$  约为  $L_K/R_N$ , 下降沿时间  $\tau_{\text{fall}}$  约为  $L_K/R_L$ , 这里  $L_K$  是纳米线的动态电感,  $R_N$  是纳米线正常态的电阻,  $R_L$  表示读出端负载电阻, 通常为  $50 \Omega$ . 当动态电感减小时, 探测事件的时间分布会因更短的  $\tau_{\text{rise}}$  而缩窄, 从而使器件的时间精度提高, 时间抖动降低. 同样探测器的电弛豫时间会因更短的  $\tau_{\text{fall}}$  而缩短, 从而更快恢复其探测光子的能力, 提升响应速度. 除此之外, 缩小光敏面更容易获得加工缺陷少的探测器, 降低由纳米线均匀性引发的时间抖动<sup>[18]</sup>. 但光敏面缩小会导致器件光耦合及光吸收难度增大, 影响器件的探测效率, 因此需要对现有 SNSPD 的器件结构和对准方式进行改进. Reddy 等<sup>[19]</sup> 通过优化分布式布拉格反射器 (distributed bragg reflector, DBR) 光学腔、增加抗反射层和光纤间隔层实现了  $20 \mu\text{m}$  光敏面器件较高的探测效率. Chang 等<sup>[20]</sup> 采用能够使光束多次反射后发散更小的 Au/SiO<sub>2</sub> 膜腔, 并调整了光纤端面与探测器芯片之间的空气隙, 从而在  $16 \mu\text{m}$  尺寸光敏面上实现了极高的探测效率. Meng 等<sup>[21]</sup> 使用了模场适配器将光纤出射光的模场直径由原先的  $10 \mu\text{m}$  缩小为  $6.3 \mu\text{m}$ ,

从而在  $10.2 \mu\text{m}$  的小尺寸光敏面上实现了高效率光耦合.

在 SNSPD 走向实用化、产品化的过程中, 除探测器芯片表现出的技术特性外, 探测器的封装方式也是其在实际应用时值得被关注的问题. 目前, 光纤与探测器芯片的封装大多采用两种方式, 一种是基于激光器、显微镜、电荷耦合元件图形传感器、微机械位移平台实现的手动对光封装方式<sup>[22]</sup>. 在这一方式中, 芯片和光纤首先需要依靠高精度机械加工的分体式铜制封装盒分别固定, 然后利用微米级加工精度的垫片调节  $Z$  方向使光纤出射光的焦平面与芯片平面重叠, 接着通过微机械位移平台调节  $X$ - $Y$  方向使光斑对准芯片光敏面, 从而完成对单一 SNSPD 探测器的光耦合. 这一封装方案具有精度高、芯片加工容错度大的优势, 但也有耗时长、体积大、重复性差的劣势. 另一种方式则是基于光纤套管自准直耦合 (以下简称“自对准”) 对探测器进行封装. 该方案是 2011 年首次由美国国家标准与技术研究所 Miller 小组<sup>[23]</sup> 开发用于超导转变沿探测器的封装, 之后 Zadeh 等<sup>[24]</sup> 又将自对准结构应用在了 SNSPD 上. 此种方式无需对准光输入, 仅依靠光纤插芯、光纤套管、探测器芯片的机械配合, 便可快速实现光纤与探测器芯片的光耦合. 虽在光耦合精度上略低于手动对光封装, 但具有批量化对光、效率高; 封装紧凑、更易集成; 光封装与电封装分体, 重复性高的突出优势, 因而逐步成为 SNSPD 的主流封装方式.

本文基于自对准封装方式, 设计并制备了光敏面直径为  $12 \mu\text{m}$  的 SNSPD 器件, 并从器件结构、加工工艺、封装方式 3 个方面进行改进优化, 在提升 SNSPD 时间特性的同时保证高探测效率. 探测器采用金属反射镜和双层纳米线架构, 能够在提高纳米线光吸收效率的同时通过改善自对准芯片外轮廓加工精度的方式提高光耦合效率, 而且兼顾了响应速度和时间抖动的优化, 并研发了配套的加工工艺完成探测器芯片的制备. 探测器封装时利用小芯径光纤来降低出射光斑与器件光敏面的对准难度, 在保证高耦合效率的前提下缩小光敏面尺寸. 从表征测试结果可以看出, 本文所制备的器件兼顾高效、低暗计数、高速、低抖动、宽谱响应的工作特性, 为 SNSPD 面向量子信息领域的大规模实用化、产品化发展提供了重要的技术参考.

## 2 器件的设计、制备、封装

### 2.1 器件结构设计

设计的器件结构如图 1(a) 所示, 最上方是由双层 NbN 超导薄膜刻蚀而成的纳米线, 其下方是由 SiO<sub>2</sub> 与 Au 组成的光学结构, 最下层是厚度为 0.4 μm 的 Si 衬底. 其中 NbN 的单层膜厚为 6.5 nm, 两层之间通过 3 nm 的 SiO<sub>2</sub> 阻隔, 线宽/周期为 75 nm/160 nm. 相对常规单层纳米线而言, 双层纳米线结构在提升 SNSPD 探测效率和时间特性上都有明显优势<sup>[25]</sup>: 有效地打破由纳米线厚度引起的光吸收率与本征效率的制约关系, 使二者同时得到提升; 拥有更高的超导转变电流和更小的动态电感, 帮助小光敏面 SNSPD 进一步优化时间特性. 在光学谐振腔的选择上, 采用 Au/SiO<sub>2</sub> 方案替代常用的 DBR 反射镜. 这是因为 DBR 反射镜通常需要几个微米的厚度才能实现高反射率, 光在其中多次反射后发散较大, 因而需要更大面积的探测器才能获得良好的光学吸收<sup>[20]</sup>. 并且对于自对准 SNSPD 而言更重要的问题是, 工艺上刻蚀较厚的 DBR 反射镜非常困难, 这导致只能从背面完成自对准芯片外轮廓的光刻和刻蚀. 受限于紫外曝光设备背面套刻精度, 采用 DBR 反射镜的自对准 SNSPD 很难缩小光敏面. 而 Au 反射镜厚度仅为纳米量级, 光束发散小; 而且容易刻蚀, 可以从正面获取自对准芯片外轮廓, 极大地提升了曝光时的套刻精度, 更适合小光敏面自对准 SNSPD. 除此之外, Au 反射镜还拥有工艺容错率高、制备简单、反射谱较宽等一系列优势. 为使纳米线在 1310 nm

入射波长处达到最佳吸收效果并考虑光学腔的加工制备情况, 仿真模型中的 SiO<sub>2</sub> 的厚度依照  $T_{\text{SiO}_2} = \lambda / (4n)$  (其中  $\lambda$  为入射光波长,  $n$  为 SiO<sub>2</sub> 折射率) 选取为 210 nm, Au 的厚度为 65 nm. 图 1(b) 给出了利用有限元软件 (Comsol Multiphysics) 对不同器件结构进行光吸收仿真的情况. 三条曲线分别表示在 800—2000 nm 波长范围内, 无光学腔结构的单层 NbN 纳米线 (黑色)、包含金属反射镜结构的单层 NbN 纳米线 (蓝色) 和包含金属反射镜结构的双层 NbN 纳米线 (红色) 的光吸收效率. 可以看出本文所采用的双层纳米线和金属反射镜架构不仅在中心波长 1310 nm 处具有极高的光吸收效率, 并且在 1000—1700 nm 较宽的波长范围内均展示出效率超过 90% 的宽谱吸收特性.

### 2.2 器件制备工艺

图 2 展示了器件加工制备流程. 其中 Au 薄膜由磁控溅射的方式生长, 构成光学腔的 SiO<sub>2</sub> 和作为中间绝缘层的 SiO<sub>2</sub> 均采用等离子体增强化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 法制备, NbN 薄膜则是由室温直流磁控溅射法生长. 在制备完成所需薄膜后, 除纳米线条采用电子束光刻技术 (electron beam lithography, EBL) 曝光外, 其余图形均采用步进式紫外光刻机 (canon stepper) 曝光. 利用曝光显影后的光刻胶做掩膜, Au 薄膜由离子束刻蚀法 (ion beam etching, IBE) 刻蚀, SiO<sub>2</sub> 和 NbN 采用反应离子刻蚀法 (reactive ion etching, RIE) 刻蚀. Si 衬底通过电感耦合等离子体法 (inductively coupled plasma, ICP) 刻蚀后, 单个的芯片呈现锁孔形状<sup>[26]</sup>, 其主

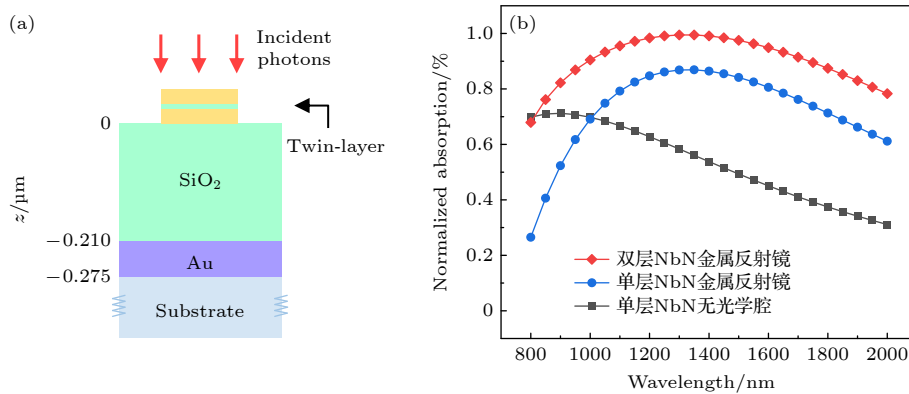


图 1 (a) 器件仿真模型; (b) 3 种不同结构的纳米线在入射光 800—2000 nm 波段的光吸收仿真情况

Fig. 1. (a) Device simulation model; (b) the optical absorption simulation of three kinds of nanowires with different structures at 800–2000 nm wavelength of incident light.

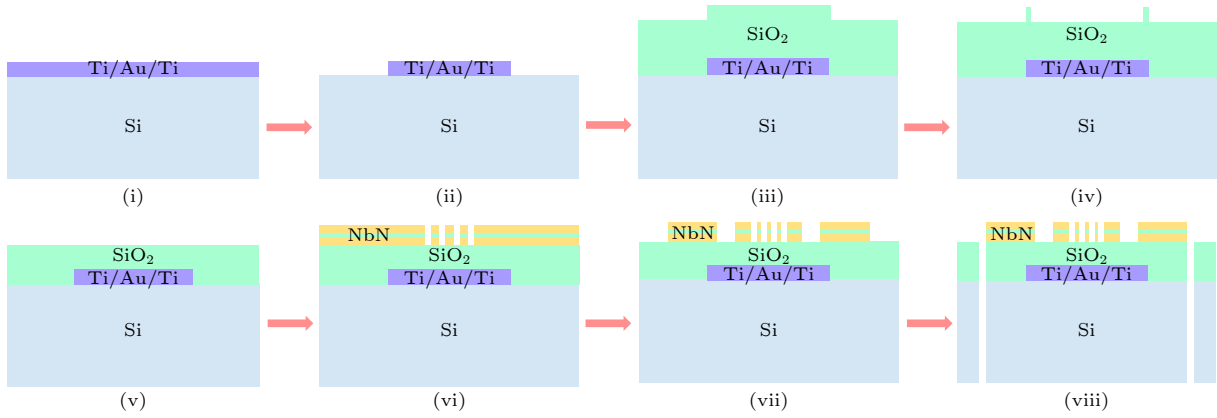


图 2 器件加工工艺流程图 (i) 通过磁控溅射法生长 Ti/Au/Ti 金属镜; (ii) 光刻后通过 IBE 法刻蚀金属镜; (iii) 采用 PECVD 法生长  $\text{SiO}_2$  层; (iv) 光刻后采用 RIE 法刻蚀  $\text{SiO}_2$  层; (v) 对  $\text{SiO}_2$  进行化学机械抛光; (vi) 通过磁控溅射法生长上下两层 NbN 薄膜, PECVD 法生长中间  $\text{SiO}_2$  夹层, 并通过 EBL 曝光、RIE 刻蚀制备纳米线条; (vii) 光刻后通过 RIE 法刻蚀 NbN 制备电极; (viii) 光刻后通过 RIE 法刻蚀  $\text{SiO}_2$  阻挡层、ICP 法刻蚀 Si 衬底获得自对准芯片

Fig. 2. Process flow chart (i) Ti/Au/Ti metal mirror is grown by magnetron sputtering; (ii) metal mirror is etched by the IBE process after lithography; (iii)  $\text{SiO}_2$  layer is grown by PECVD process; (iv)  $\text{SiO}_2$  layer is etched by RIE process after lithography; (v) chemical mechanical polishing of  $\text{SiO}_2$  layer; (vi) the upper and lower NbN layers are grown by magnetron sputtering, and the intermediate  $\text{SiO}_2$  layer is grown by PECVD process, and the nanowires are prepared by EBL exposure and RIE etching. (vii) the electrode is prepared by etching the NbN by RIE process after lithography; (viii)  $\text{SiO}_2$  layer is etched by RIE process and Si substrate is etched by ICP process after lithography to obtain self-aligned chips.

体部分为与回形纳米线同心的圆形, 柄状区域为引出的两个电极. 在此之中, Au 反射镜的制备和 NbN 薄膜生长前平坦衬底的获得是关键步骤.

Au 反射镜图案的设计需要考虑 3 个方面. 第一, 芯片电极与外部引脚电连接时的打线力度不易控制, 如果打穿  $\text{SiO}_2$  层将会使纳米线被下方 Au 膜短路, 因而电极处不能有 Au 覆盖; 第二, 在最后一步刻穿硅片获得芯片时, Au 是刻蚀阻挡层, 因而芯片外轮廓处不能有 Au 覆盖; 第三, 为了达到入射光在谐振腔中不断反射再被纳米线吸收的效果, Au 应位于纳米线正下方且面积不宜过小. 在加工制备时, 为了增大 Au 与上方  $\text{SiO}_2$ 、下方 Si 的粘附性, 在 Au 膜生长前后, 分别原位生长 5 nm 的 Ti 薄膜. 因此最终得到的金属镜为直径 200  $\mu\text{m}$ , 厚度 75 nm 的饼状图形.

由于金属层刻蚀后, 保留下不小于 75 nm 高度的台阶起伏, 而 NbN 薄膜仅有几个纳米厚, 因此 NbN 薄膜并不适合在起伏的  $\text{SiO}_2$  表面直接生长. 为改善  $\text{SiO}_2$  的表面质量, 引入化学机械抛光法 (chemical mechanical polishing, CMP) 进行平坦化抛光. 为达到更好的抛光效果, 首先通过光刻和刻蚀工艺仅在台阶边缘保留厚度为 0.5  $\mu\text{m}$  的圆环形  $\text{SiO}_2$ , 如图 2(iv) 所示. 然后抛光研磨至  $\text{SiO}_2$  的设计值 210 nm, 如图 2(v). 利用原子力显微镜

(atomic force microscope, AFM) 测得抛光前后  $\text{SiO}_2$  的表面粗糙度由 1.2 nm 改善至 0.4 nm.

锁孔形外轮廓的光刻和刻蚀是器件光耦合对准的关键. 选用套刻精度为 40 nm 的 Canon Stepper 光刻机以及 SPR220 型号的光刻厚胶 (4  $\mu\text{m}$ ) 进行曝光, 采取从器件正面进行一次光刻、两次刻蚀 (210 nm 的  $\text{SiO}_2$  和 0.4  $\mu\text{m}$  的 Si) 的方法来减小套刻误差, 并且添加了 X, Y 两个方向上的梳齿状对准标记来量化对准精度, 最终的套刻误差小于 0.08  $\mu\text{m}$ .

图 3(a), (b) 是器件光敏区的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图和高倍率下的纳米线细节图, 可以看到刻蚀后的纳米线条平直度较好, 这与 EBL 曝光时电子更容易导出有关. 图 3(c) 是器件截面的透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 图, 其中 Au 上方  $\text{SiO}_2$  厚度为 204 nm, 与设计值 210 nm 有少量出入. 这与测量时椭偏仪的拟合误差有关, 将会对 1310 nm 处器件的吸收效率带来一定影响.

### 2.3 器件封装

探测器光封装模块和电封装模块可拆分是采用自对准封装的 SNSPD 可以实现批量化对光的原因. 采用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 作为基座以及电路连接模块, 通过引线键合

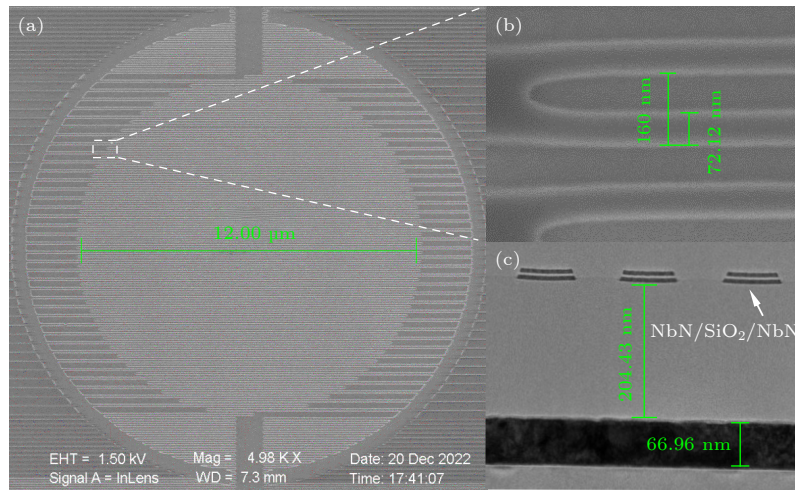


图 3 (a) 器件光敏面 SEM 图; (b) 高度放大的 NbN 纳米线 SEM 图; (c) 器件横截面 TEM 图

Fig. 3. (a) SEM image of the active area of the device; (b) SEM image zoomed in on the NbN nanowires; (c) TEM image of the cross section of the nanowires.

的方式与芯片柄状部分的电极连接, 完成器件端的电封装. 光封装采用光纤插芯、光纤套管、芯片圆形轮廓三者尺寸上的过盈配合而无需外接对准光源即可完成光纤出射光和芯片光敏面的对准, PCB 板和光纤套管之间通过低温胶固定. 并且光纤插芯与光纤套管由同一材料 (氧化锆) 制成, 具有相同的热膨胀系数, 其在超导态所需的低温下也能保证较高的准确度. 为了进一步提高探测器的光耦合效率, 选取模场直径  $6\ \mu\text{m}$  的 HI 1060 FLEX 光纤来匹配  $12\ \mu\text{m}$  的小尺寸光敏面, 较细的纤芯也同时使探测器中与黑体辐射有关的暗计数得到降低.

图 4 展示了未安装光纤的自对准 SNSPD 器件. 工作时, 将探测器固定在 16 通道集成冷盘上并安置在基于 GM 制冷机工作的恒温器的 4 K 冷区中, 最低工作温度为 2.2 K. 电信号通过 PCB 板上焊接的 SMP 电连接器连接至低温系统同轴线, 再与外部读出电路连接. 器件直流偏置依靠与恒压

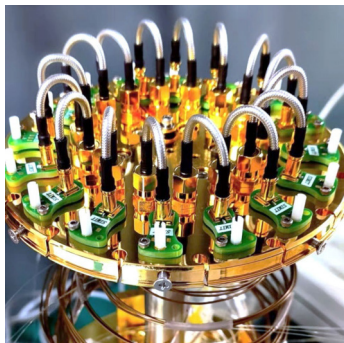


图 4 封装好的探测器芯片放置在恒温器的 4 K 冷台上  
Fig. 4. The packaged chips are mounted on the 4 K cold plate.

源串联的  $100\ \text{k}\Omega$  电阻提供. 电脉冲信号由 50 dB 增益的放大器放大后, 再由示波器/计数器完成信号采集. 光信号由超连续激光器发射, 经过滤波器和光衰减器后接入光功率计, 使特定波长的入射光达到单光子水平. 随后接入偏振控制器调节入射光偏振态, 最后与探测器芯片上方的小芯径光纤相连即可连通光路.

### 3 器件性能测试及结果分析

图 5 所示为 2.2 K 温度下, 器件在 0.1 MHz 入射光, 1310 nm 和 1550 nm 波长下的系统探测效率 (SDE) 和暗计数率 (DCR) 的测试结果. 其中, 实心曲线对应左轴 SDE, 空心曲线对应右轴 DCR. 在纳米线达到饱和的本征效率时, 1310 nm 波长下 SDE 为 82%, 1550 nm 波长下 SDE 为 70%, DCR 为 70 cps. 实验中所测得的器件系统探测效率略低于仿真值, 这是受由  $\text{SiO}_2$  介质层厚度和材料折射率差异造成的光吸收偏移, 以及由光纤头/套管/芯片外轮廓三者的同心度偏差造成的光耦合损失等多个因素共同影响. 本工作还对器件的入射光子响应波段进行表征, 测试结果如图 5(b) 所示, 各个波长下的 SDE 均为器件在  $22\ \mu\text{A}$  偏置电流、2.2 K 工作温度下的测量值. 可以看到器件在 1064—1600 nm 波段的 SDE 均达到 60% 以上, 显示其拥有较好的宽谱响应特性. 在后续实验中, 将继续优化微纳加工工艺和机械加工精度, 进一步提高小光敏面器件在较宽波段下的探测效率.

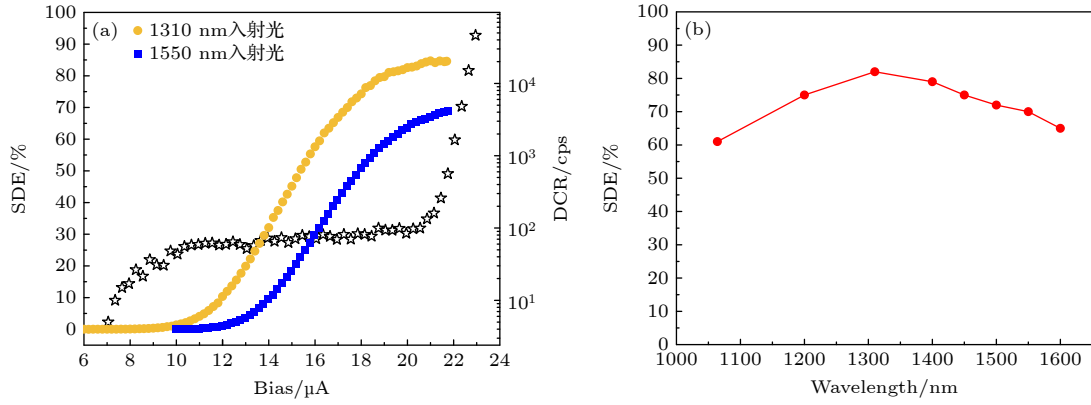


图 5 (a) 器件探测效率和暗计数率随偏置电流的变化曲线; (b) 器件在入射光 1064—1600 nm 波段的探测效率

Fig. 5. (a) SDE and DCR as a function of the bias currents; (b) SDE of the device at 1064–1600 nm.

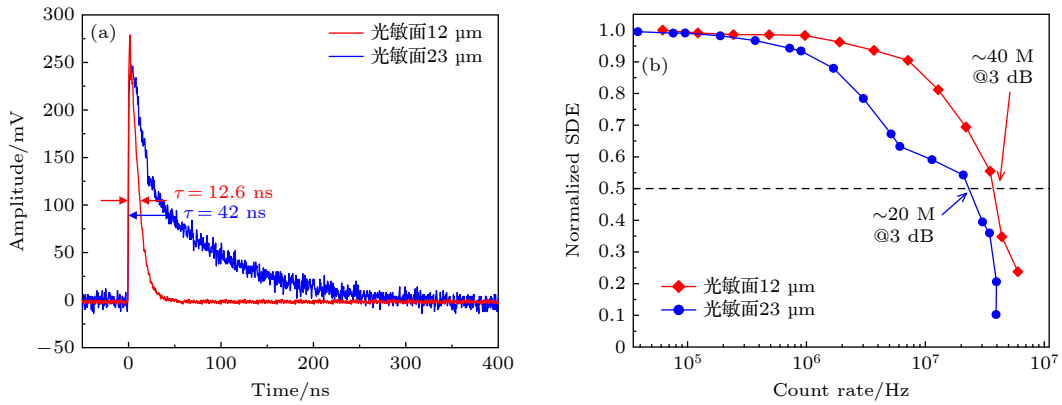


图 6 (a) 12 μm 光敏面器件和 23 μm 光敏面器件响应波形和恢复时间; (b) 12 μm 光敏面器件和 23 μm 光敏面器件归一化探测效率随入射光子数的变化曲线

Fig. 6. (a) Response waveform and recovery time of 12 μm active area device and 23 μm active area device; (b) curves of normalized detection efficiency of 12 μm active area device and 23 μm pactive area device with the number of incident photons.

图 6 反映出该探测器的响应速度情况. 其中图 6(a) 红色曲线为器件经 50 dB 放大后的脉冲响应波形. 取信号下降至脉冲幅值的 1/e 时对应的横坐标间隔为器件恢复时间, 约为 12.6 ns. 图 6(b) 红色曲线为探测器的计数率曲线, 随着光强的增大器件的探测效率不断降低, 效率降至最大值的 50% 时器件的计数率约为 40 MHz@3 dB.

图 7 反映出该探测器的时间抖动情况. 利用时间相关单光子计数 (timing correlated single photon counting, TCPSC) 系统和飞秒激光器, 测得探测器脉冲到达时间的高斯统计图, 取其半高全宽为探测器的时间抖动. 图 7 中红色曲线展示了 2.2 K 温度下, 通过室温放大器放大输出信号时器件的抖动值. 当偏置电流处于饱和工作点 22 μA 时, 12 μm 光敏面器件的时间抖动约为 38 ps. 该抖动包含了电路噪声以及放大器本身所带来的时间抖动分量. 为了进一步降低器件抖动值, 可以利用低温放大器

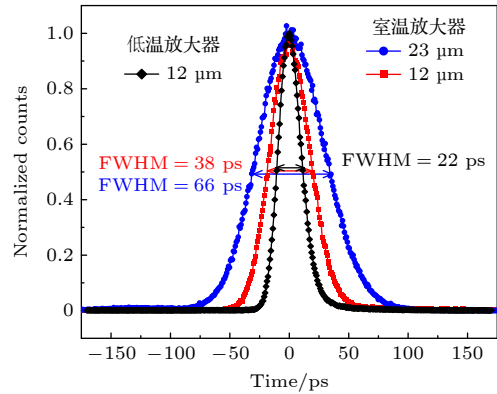


图 7 采用室温放大器放大输出信号时 23 μm 光敏面器件 (蓝)、12 μm 光敏面器件 (红) 的时间抖动与采用低温放大器放大输出信号时 12 μm 光敏面器件 (黑) 的时间抖动

Fig. 7. The timing jitter of 23 μm active area device (blue) and 12 μm active area device (red) when the output signal was amplified by room temperature amplifier respectively, and the timing jitter of 12 μm active area device (black) when the output signal was amplified by cryogenic amplifier.

替代室温放大器来降低读出噪声. 将探测器置于 0.86 K 的温度下并通过低温放大器放大输出信号, 如图 7 黑色曲线所示器件在偏置电流为 28  $\mu\text{A}$  时的时间抖动值降至 22 ps.

作为对比, 本文同时测试了 2.2 K 工作温度下, 23  $\mu\text{m}$  光敏面双层 SNSPD 器件的响应速度及时间抖动. 由图 6(a), (b)、图 7 蓝色曲线可以看出, 相较于 23  $\mu\text{m}$  光敏面器件 42 ns 的恢复时间、20 MHz @3 dB 的计数率、66 ps 的时间抖动, 本文制备的小光敏面器件的响应速度和时间抖动特性均有显著提升.

## 4 结 论

本文基于现阶段量子通信和量子计算领域对高效率、低抖动、高速度的实用化单光子探测器的需求, 设计了一种批量封装的自对准 SNSPD, 并同时进行了工艺加工和封装结构上的优化. 所制备器件的性能表征显示, 在 2.2 K 的温度下, 在光通信常用的 1310 nm 以及 1550 nm 波长处器件分别有着 82% 和 70% 的系统探测效率, 并且在 1200—1600 nm 波长范围内, 系统探测效率均大于 65%. 器件恢复时间为 12.6 ns, 计数率达到 40 MHz@3 dB. 最优时间抖动仅为 22 ps. 后续将该探测器与优化的读出电路相配合, 有望达到更加优异的综合性能, 进一步拓宽应用场景.

## 参考文献

- [1] Zhang W J, You L X, Li H, Huang J, Lv C L, Zhang L, Liu X Y, Wu J J, Wang Z, Xie X M 2017 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **60** 1
- [2] Zhang W J, Yang X Y, Li H, You L X, Lv C L, Zhang L, Zhang C J, Liu X Y, Wang Z, Xie X M 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 035012
- [3] Knehr E, Kuzmin A, Doerner S, Wuensch S, Ilin K, Schmidt H, Siegel M 2020 *Appl. Phys. Lett.* **117** 132602
- [4] Esmaeil Z I, Los J W N, Gourgues R B M, Chang J, Elshaari A W, Zichi J R, van Staaden Y J, Swens J P E, Kalhor N, Guardiani A, Meng Y, Zou K, Dobrovolskiy S, Fognini A W, Schaart D R, Dalacu D, Poole P J, Reimer M E, Hu X, Pereira S F, Zwiller V, Dorenbos S N 2020 *ACS Photon.* **7** 1780
- [5] Khatri F I, Robinson B S, Semprucci M D, Boroson D M 2015 *Acta Astronaut.* **111** 77
- [6] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, Chen M C, Peng L C, Luo Y H, Qin J, Wu D, Ding X, Hu Y, Hu P, Yang X Y, Zhang W J, Li H, Li Y, Jiang X, Gan L, Yang G, You L, Wang Z, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2020 *Science* **370** 1460
- [7] Zhang B, Guan Y Q, Xia L, Dong D, Chen Q, Xu C, Wu C, Huang H, Zhang L, Kang L, Chen J, Wu P 2021 *Supercond. Sci. Tech.* **34** 034005
- [8] You L 2020 *Nanophotonics* **9** 2673
- [9] Sun W, Jia X H, Tu X C, Zhao Q Y, Zhang L B, Kang L, Chen J, Wu P H 2022 *Cryog. Supercond.* **50** 9 (in Chinese) [孙伟, 贾小氢, 涂学湊, 赵清源, 张蜡宝, 康琳, 陈健, 吴培亨 2022 *低温与超导* **50** 9]
- [10] Calandri N, Zhao Q Y, Zhu D, Dane A, Berggren K K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 152601
- [11] Semenov A, Günther B, Böttger U, Hübers H W, Bartolf H, Engel A, Schilling A, Ilin K, Siegel M, Schneider R, Gerthsen D, Gippius N A 2009 *Phys. Rev. B* **80** 054510
- [12] Banerjee A, Heath R M, Morozov D, Hemakumara D, Nasti U, Thayne I, Hadfield R H 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 2072
- [13] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardananov A, Williams C, Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 705
- [14] Semenov A, Engel A, Hübers H W, Ilin K, Siegel M 2005 *Eur. Phys. J. B* **47** 495
- [15] Yang J K W, Kerman A J, Dauler E A, Anant V, Rosfjord K M, Berggren K K 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **17** 581
- [16] Kerman A J, Yang J K W, Molnar R J, Dauler E A, Berggren K K 2009 *Phys. Rev. B* **79** 100509
- [17] Kerman A J, Dauler E A, Keicher W E, Yang J K W, Berggren K K, Gol'tsman G, Voronov B 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 111116
- [18] Allmaras J P, Kozorezov A G, Korzh B A, Berggren K K, Shaw M D 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 034062
- [19] Reddy D V, Nerem R R, Nam S W, Mirin R P, Verma V B 2020 *Optica* **7** 1649
- [20] Chang J, Los J W N, Tenorio P 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
- [21] Meng Y, Zou K, Hu N, Xu L, Lan X, Steinhauer S, Gyger S, Zwiller V, Hu X J 2020 arXiv: 2012.06730
- [22] Miki S, Yamashita T, Fujiwara M, Sasaki M, Wang Z 2010 *Opt. Lett.* **35** 2133
- [23] Miller A J, Lita A E, Calkins B, Vayshenker I, Gruber S M, Nam S W 2011 *Opt. Express* **19** 9102
- [24] Zadeh I E, Los J W N, Gourgues R B M, Steinmetz V, Bulgarini G, Dobrovolskiy S M, Zwiller V, Dorenbos S N 2017 *APL Photonics* **2** 111301
- [25] Hu P, Li H, You L, Wang H, Xiao Y, Huang J, Yang X, Zhang W, Wang Z, Xie X 2020 *Opt. Express* **28** 36884
- [26] Geng R X, Li H, Huang J, Hu P, Xiao Y, Yu H Q, You L X 2021 *Laser Optoelectron. Pro.* **58** 285 (in Chinese) [耿荣鑫, 李浩, 黄佳, 胡鹏, 肖游, 余慧勤, 尤立星 2021 *激光与光电子学进展* **58** 285]

# High comprehensive performance superconducting nanowire single photon detector\*

Xi Ling-Ling<sup>1)2)3)</sup> Yang Xiao-Yan<sup>1)2)†</sup> Zhang Tian-Zhu<sup>1)2)3)</sup>  
 Xiao You<sup>1)2)3)</sup> You Li-Xing<sup>1)2)</sup> Li Hao<sup>1)2)‡</sup>

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) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

( Received 6 March 2023; revised manuscript received 25 March 2023 )

## Abstract

Superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) has been widely used in quantum communication, quantum computing and other fields because of its excellent timing jitter and response speed. However, due to the mutual restraint of the technical parameters of SNSPD nanowires, there are technical challenges to further improve the comprehensive performance of SNSPD, and thus limiting its application on a large scale. Combining high detection efficiency with high timing performance is still an outstanding challenge. In this work, we report the SNSPD with 12- $\mu\text{m}$  small active area, which has high speed, high efficiency, low jitter and broadband absorption. Au/SiO<sub>2</sub> membrane cavity, which is determined by finite element analysis simulation, is used to widen the optical response bandwidth. And it is easier to process and improve the alignment accuracy at the same time. The flat substrate is more conducive to the growth of superconducting thin films, so flattening process is introduced. Device package is also optimized to match smaller detector. Self-aligned packaging makes optical alignment more convenient and time-saving. Special optical fibers with small mode-field diameters can reduce the negative effect of the detector on optical coupling. The detector can achieve a maximum SDE of 82% at the central wavelength of 1310 nm and the temperature of 2.2 K, and the SDE of more than 65% in the wavelength range of 1200–1600 nm, with DCR of 70 cps. The detector also exhibits a count rate of 40 MHz@3 dB and a timing jitter of 38 ps, which is significantly improved compared with 23- $\mu\text{m}$  active area detector. Furthermore, the minimum timing jitter of 22 ps can be obtained by using cryogenic amplifier readout. In this work, high comprehensive performance detector is developed, which provides an important technical reference for practical and product SNSPD.

**Keywords:** superconducting nanowire single photon detector, self-aligned package, small active area

**PACS:** 85.25.Pb, 85.60.Gz

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230326

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61971408, 61827823, 12033007), Shanghai Rising-Star Program (Grant No. 20QA1410900), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2020241).

† Corresponding author. E-mail: [yxy@mail.sim.ac.cn](mailto:yxy@mail.sim.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [lihao@mail.sim.ac.cn](mailto:lihao@mail.sim.ac.cn)



## 高综合性能超导纳米线单光子探测器

郝玲玲 杨晓燕 张天柱 肖游 尤立星 李浩

### High comprehensive performance superconducting nanowire single photon detector

Xi Ling-Ling Yang Xiao-Yan Zhang Tian-Zhu Xiao You You Li-Xing Li Hao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 118501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230326

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230326>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 自差分交流偏置超导纳米线单光子探测器

Superconducting nanowire single photon detector under AC-bias with self-differential readout

物理学报. 2022, 71(15): 158501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220373>

#### 超大面积超导纳米线阵列单光子探测器设计与制备

Design and fabrication of single photon detector with ultra-large area superconducting nanowire array

物理学报. 2022, 71(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221569>

#### 高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器

High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210486>

#### 超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展

Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210652>

#### 5—10 m波段超导单光子探测器设计与研制

Design and fabrication of superconducting single-photon detector operating in 510  $\mu$  m wavelength band

物理学报. 2022, 71(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221594>

#### 超导动态电感单光子探测器的噪声处理

Noise processing of superconducting kinetic inductance single photon detector

物理学报. 2021, 70(14): 140703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210185>