

## 自对准超导纳米线单光子探测器

耿荣鑫<sup>1,2,3</sup>, 李浩<sup>1,2,4\*</sup>, 黄佳<sup>1,2</sup>, 胡鹏<sup>1,2,3</sup>, 肖游<sup>1,2,3</sup>, 余慧勤<sup>1,2</sup>, 尤立星<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>4</sup>中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200050

**摘要** 为实现超导纳米线单光子探测器(SNSPD)快速、稳定的封装,提出将光纤和器件光敏面快速耦合的自对准封装方式。首先通过半导体微纳加工工艺制备了基于介质反射镜结构的 SNSPD 器件,再利用双面套刻和深硅刻蚀技术制备出特定的 SNSPD 器件形状。然后设计了以光纤套管、PCB 板、陶瓷插芯为主体的封装结构并实现了 SNSPD 芯片与光纤陶瓷插芯的快速对准及封装,最后在 2.2 K 的低温下表征了自对准 SNSPD 的性能。本批次器件最优的结果是在 1550 nm 达到 93.7% 的探测效率。通过重复性实验验证了自对准 SNSPD 的稳定性。实验结果表明,在反复升降温的情况下,器件效率值波动标准差在±0.60%以内。在反复插拔光纤的情况下,波动标准差为±1.80%,最大为 3.24%。说明了制备的自对准 SNSPD 具有良好的稳定性,该封装方式有望为未来 SNSPD 封装模式提供参考,并为其集成化和商业化提供前期探索可能。

**关键词** 成像系统;单光子探测器;超导;自对准;稳定性

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011022

## Self-Aligned Superconducting Nanowire Single Photon Detector

Geng Rongxin<sup>1,2,3</sup>, Li Hao<sup>1,2,4\*</sup>, Huang Jia<sup>1,2</sup>, Hu Peng<sup>1,2,3</sup>, Xiao You<sup>1,2,3</sup>,  
Yu Huiqin<sup>1,2</sup>, You Lixing<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200050, China;<sup>2</sup>Center for Excellence in Superconducting Electronics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200050, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;<sup>4</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200050, China

**Abstract** For fast and stable packaging of superconducting nanowire single photon detector (SNSPD), a self-aligned packaging method is developed that directly couples the optical fiber and the photosensitive area of the device. First, the SNSPD devices based on the dielectric mirror structure are fabricated by semiconductor micro-nano processing technology. The double-sided exposure and deep silicon etching technology are used to prepare the SNSPD chips, whose size matches well with the fiber sleeves. Then the main packaging structure including optical fiber sleeve, PCB, zirconia ferrule, etc. are glued together and packaged with the SNSPD chips. Finally, the self-aligned SNSPDs are characterized at the temperature of 2.2 K. The optimal result is 93.7% of detection efficiency

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-03-01; 录用日期: 2021-03-15

基金项目: 科技部重点研发计划(2017YFA0304000)、国家自然科学基金(61971408, 61827823)、上海市重大项目(2019SHZDZX01)、上海市启明星项目(20QA1410900)、中科院青年创新促进会项目(2020241)、中国科学院空间主动光电技术重点实验室开放课题项目

\*E-mail: lihao@mail.sim.ac.cn; \*\*E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn

at 1550 nm. The stability of the self-aligned SNSPD is verified by repeated experiments. The results show that the standard deviation of the device efficiency fluctuation is within  $\pm 0.60\%$  in the case of repeated temperature rise and fall. The standard deviation of the device efficiency fluctuation is  $\pm 1.80\%$ , and the maximum is  $3.24\%$  in the case of repeated insertion and extraction of optical fibers. Experimental results show that the self-aligned SNSPD has good stability, and this packaging method is expected to provide a reference for the future SNSPD packaging mode and provide early exploration possibilities for its integration and commercialization.

**Key words** imaging systems; single photon detector; superconducting; self-aligned; stability

**OCIS codes** 040.5160; 040.3060; 310.6845

## 1 引言

超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是近二十年间快速发展的一类单光子探测器<sup>[1-2]</sup>,相对于传统的半导体探测器<sup>[3-8]</sup>,SNSPD 具有探测效率(SDE)高<sup>[9]</sup>( $>98\%$ )、计数率高<sup>[10]</sup>(约 1 GHz)、暗计数(DCR)低<sup>[11]</sup>( $<1$  Hz)、时间抖动小<sup>[12]</sup>(约 3 ps)等一系列显著优势。因此已经在量子通信<sup>[13-14]</sup>、地月通信<sup>[15]</sup>、激光雷达<sup>[16-17]</sup>等领域取得了广泛的应用。

SNSPD 的基本原理是基于超导材料纳米线结构的热点效应<sup>[18-19]</sup>。首先给纳米线施加一个略低于其临界电流的偏置电流( $I_b$ ),当处于超导态的纳米线吸收到一个光子能量(约 1 eV)后,会形成一个横跨纳米线的有阻区域,该有阻区能量很快通过衬底弛豫掉重新恢复到超导态,从而在纳米线两端产生一个快速的电压脉冲信号,通过对电压信号的检测,就可以实现单光子探测。

目前国内外已经有超过 10 个国家,近 30 家研究机构开展了 SNSPD 相关研究工作<sup>[1]</sup>。国外著名的研究团队包括美国国家标准与技术研究院(NIST)和麻省理工学院(MIT),欧洲的 TU Delft 和 Glasgow、日本的情报通信研究机构(NICT)、俄罗斯的莫斯科国立师范大学(MSPU)等。国内开展相关研究的机构包括中国科学院上海微系统与信息技术研究所、南京大学、天津大学等。随着量子信息产业化的飞速发展,SNSPD 也存在巨大商业应用的潜在市场。国际上也因此出现了多个以 SNSPD 为核心产品的小型科技公司,包括俄罗斯的 Scontel、荷兰的 Single Quantum、美国的 Quantum Opus、Photon Spot、瑞士的 ID Quantique 以及中国上海赋同科技有限公司。国外机构较早地开始采用自对准的封装方式,如 2012 年美国 NIST 团队率先使用自对准封装方式制备了超导转变沿探测器(TES)<sup>[20]</sup>,2017 年,荷兰的 Esmail 等<sup>[21]</sup>用铌钛氮(NbTiN)材料制成的 SNSPD 采用自对准封装方式在 1310 nm 波段测到了大于 90%的效率。而国内大都还是采

用手动对光的方式,如中国科学院上海微系统与信息技术研究所<sup>[22]</sup>制备得到了探测效率达到 98%的 SNSPD。

SNSPD 的常见封装方式是基于铜模块的手动对光封装<sup>[23]</sup>。其借助铜模块的夹持固定在光学显微镜下通过电荷耦合元件(CCD)成像功能观察光纤光斑相对于器件光敏面的位置,不断微调光斑位置使之居于光敏面中心位置,并改变垫片厚度调整光斑焦距使其与光敏面处于同一焦平面。手动对光的方式能使光耦合效率达到最大化,但同时也面临着以下几点问题:1)步骤繁琐,单次对光耗时在 20~30 min 左右;2)铜基座对加工精度要求较高,需专门定制,故成本较高;3)传统封装盒体积较大,不利于集成化;4)常温下手动对光完成后,放置在低温下测试时对准光斑会发生偏移,导致对准精度下降;5)对光完成后需要封胶使之成为一体结构,便携性及可重复性差。

本文基于介质反射镜的 SNSPD 器件,设计了一种直接将光纤光斑与器件光敏面耦合在一起的自对准封装方式,并通过微纳加工工艺制备了 SNSPD 芯片,在低温下表征了自对准 SNSPD 的性能。最后经过若干次重复性实验验证了自对准封装的稳定性,得到了可靠稳定的高性能 SNSPD,为未来 SNSPD 的集成化使用 and 商业化普及提供了前期探索。

## 2 器件的制备以及封装

### 2.1 器件制备工艺

首先使用电子设计自动化(EDA)绘图软件完成器件版图的绘制,包括纳米线、电极、器件外形等图层。主要的加工工艺流程包括以下步骤。

1) 使用离子束辅助沉积设备在硅衬底上制备设计介质反射镜光学薄膜,薄膜由低折射率材料  $\text{SiO}_2$  和高折射率材料  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  交替堆叠而成。

2) 使用日本 ULVAC 公司生产的 SME-200J 多腔体磁控溅射磁控系统对 2 英寸(1 英寸=2.54 cm)

的介质反射镜衬底进行清洗然后在上面生长约 7 nm 的超导氮化铌(NbN)薄膜,并使用德国 SUSS 生产的 Delta-80 匀胶机旋涂光刻胶 ZEP520。

3) 使用日本 JOEL 公司生产的电子束曝光设备 JBX-6300FS 在光刻胶上曝光得到纳米线结构,并显影定影。

4) 将定影完成后的片子放入日本 Samco 公司生产的 RIE-10NR 型反应离子刻蚀机内,刻蚀气体为  $CF_4$ 。刻蚀薄膜材料将纳米线图形转移到 NbN 薄膜材料上,然后清洗残胶。图 1 为扫描电子显微镜(SEM)图。

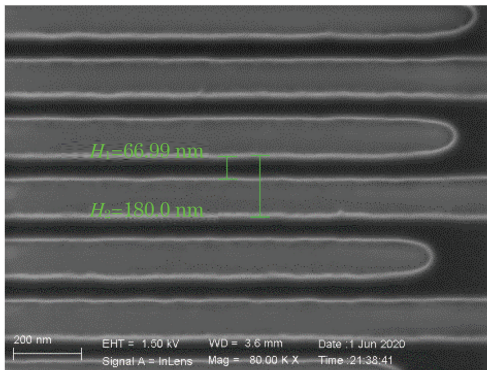


图 1 纳米线结构的 SEM 图

Fig. 1 SEM image of nanowire structure

5) 旋涂光刻胶 AZ703,使用德国 SUSS 生产的 MA6 接触式紫外曝光机进行光刻得到电极图形。显影定影后再次使用反应离子刻蚀机刻蚀电极,然后清洗残胶。

6) 背面涂覆光刻胶 SPR220,在接触式紫外曝光机下完成背面套刻曝光。

7) 使用英国 Oxford 公司生产的 PlasmaPro Estrelas100 深硅刻蚀机从背面刻穿约 400  $\mu\text{m}$  厚的硅衬底,得到最终的器件形状。最后清洗残胶。

其中电感耦合等离子体(ICP)深硅刻蚀工艺是制备自对准器件的核心工艺,也是最终得到钥匙形状器件的关键步骤。ICP 基本原理<sup>[24]</sup>是采用侧壁钝化技术,将沉积钝化与刻蚀交替进行,钝化气体和刻蚀气体分别是  $C_4F_8$  与  $SF_6$ ,具有良好的各向异性。首先在侧壁上沉积一层聚合物钝化膜,再将聚合物和硅同时进行刻蚀。在这个循环中通过刻蚀和沉积间的平衡控制来得到精确的各向异性刻蚀效果。在光刻掩模板中将刻蚀深宽比设计为 400  $\mu\text{m}$ : 50  $\mu\text{m}$ ,使刻蚀等离子体更易进入到刻蚀底部,改善了侧壁陡直度。刻穿约 400  $\mu\text{m}$  的硅衬底得到的侧壁形貌如图 2 所示。最终得到的器件形状如图 3 所示。其中心区域是直径在 15~30  $\mu\text{m}$  的纳米线光敏面,引出电极部分设置在柄状区域。

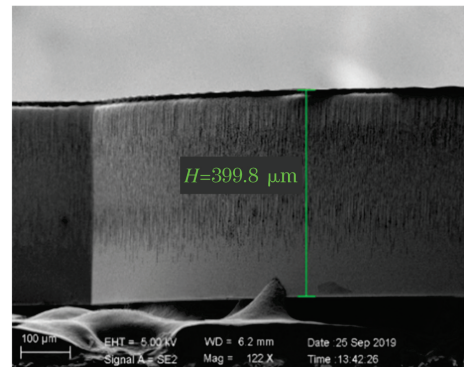


图 2 深硅刻蚀侧壁 SEM 图

Fig. 2 SEM image of sidewall etched by deep silicon

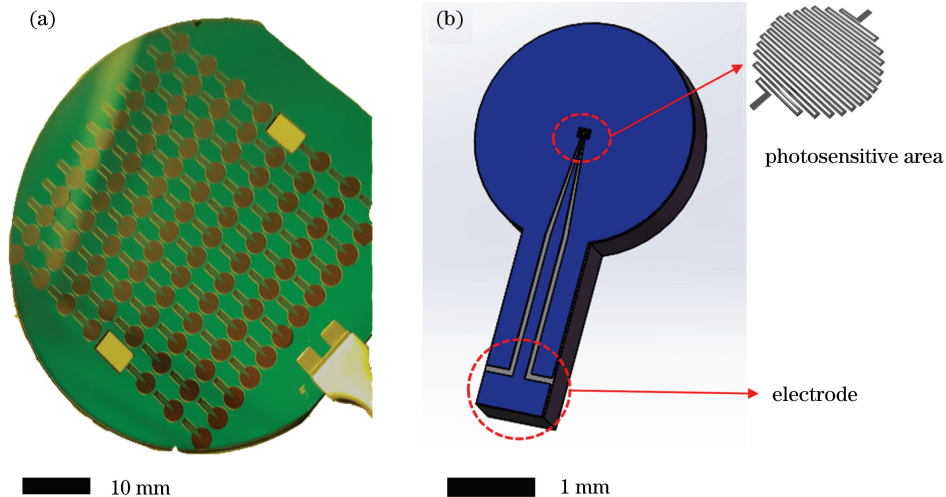


图 3 自对准 SNSPD 芯片。(a)自对准器件流片成品;(b)单个芯片模型

Fig. 3 Self-aligned SNSPD chip. (a) Tape-out product of self-aligned device; (b) model of single chip

### 2.2 自对准封装设计

采用印刷电路板(PCB)、光纤套管、陶瓷插芯、超小型推入式射频连接器(SMP)等来对 SNSPD 芯片完成自对准封装(图 4)。其中,光纤套管、陶瓷插芯是光纤通信领域常用的零部件,可根据自身的实际需求向厂家定制获得。所使用的光纤是目前商业化单模光纤。PCB 板的设计目的是作为 SNSPD 芯片的载体以及连接外围电路。通过引线键合机将器件正负极与 PCB 板上的 SMP 相连接,再通过 SMP 连接到外围电路构成回路。光纤的另一端通过熔接方式与外接光路连接。

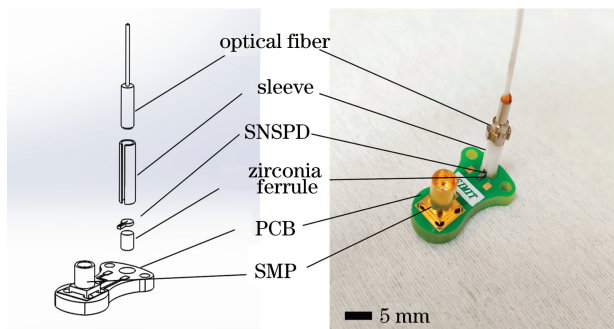


图 4 自对准 SNSPD 图

Fig. 4 Photograph of self-aligned SNSPD

SNSPD 芯片圆形部分、光纤头的直径以及光纤套管内径大小一致,光纤套管将光纤头与芯片同心约束在一起,使光纤头发射出的光斑自动对准器件中心的光敏面区域。光纤与器件之间的同心度误差来源主要包括以下几点:背面曝光精度、深硅刻蚀得到的器件精度、光纤套管的精度、光纤头的精度。通过设计实验可以观测到最终的对准精度在  $4\ \mu\text{m}$  左右(图 5)。

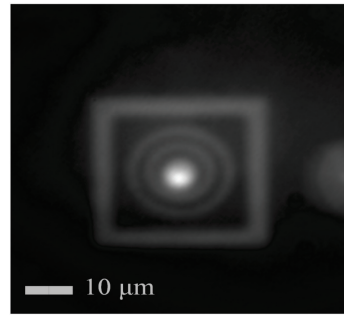


图 5 光斑相对于器件光敏面中心的偏移情况

Fig. 5 Deviation of light spot relative to center of photosensitive area of device

### 3 性能表征

#### 3.1 测试系统

将制备得到的自对准 SNSPD 器件固定在多通道的低温恒温系统中,通过 G-M 商用循环制冷机使器件处于  $2.2\ \text{K}$  的超导态温度下。结合外部的电路系统以及光路系统,便可进行单光子探测实验。电路上使用 SIM928 隔离低噪声电压源给 SNSPD 提供一个偏置电流,器件端串联一个  $100\ \text{k}\Omega$  的电阻,较大的串联电阻也保证了器件的工作不受外界环境噪声的影响。偏置树(Bias Tee)是一个三端口的元器件,主要作用是分离直流和交流信号,给器件提供稳定的直流偏置并把器件的交流响应信号从另一端输出。SNSPD 接收到光子后产生的电脉冲信号通过 Bias Tee 的高频端输出后,经过超宽频放大器放大,最后利用高频示波器观察时域脉冲波形或利用计数器(SR400)进行计数。

光路上使用  $1550\ \text{nm}$  飞秒激光器加光衰减器和光功率计,通过光衰减器的衰减以及光功率计的标定使得一定数目的光子打在 SNSPD 芯片上。具体的测试系统如图 6 所示。

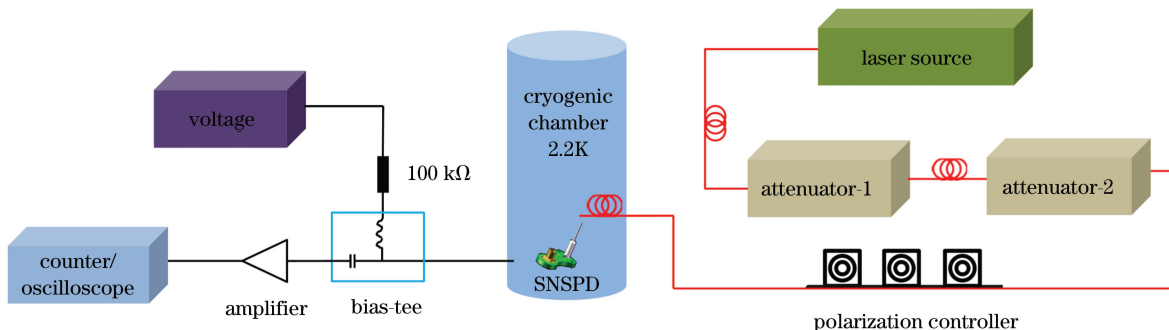


图 6 SNSPD 测试系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of SNSPD test system

### 3.2 测试结果

完成器件的加工与封装,以及测试系统的搭建后,本文对所制备的自对准 SNSPD 器件的性能稳定性进行了表征。目前已经成功制备到一批探测效率大于 90% 的自对准 SNSPD,最高效率为 93.7%。如图 7 所示,实心曲线表示左轴探测效率随着偏置电流的变化情况,空心曲线表示右轴暗计数水平随着偏置电流的变化情况。测试过程中,由于计数波动以及光路传输中的波动会导致测试结果的不确定性,主要包括光源、光衰减器、偏振控制器以及熔接光纤的不确定度。经过精准标定可得到整体测试不确定度<sup>[22]</sup> $\sigma = \pm 1.0\%$ 。我们相信随着未来器件工艺的进一步优化,效率有望进一步提升。

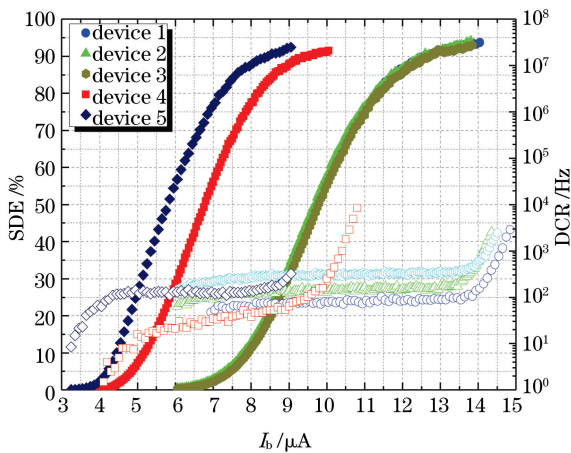


图 7 探测效率及暗计数随偏置电流的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of SDE and DCR with bias current

### 3.3 稳定性测试

传统的铜座封装器件在低温下由于铜座热胀冷缩的原因,在经历若干次的升降温测试后导致光纤光斑相对于器件光敏面的轴向距离发生了较大偏移,最大可达到十几微米<sup>[23]</sup>,从而使得器件的光耦合效率大幅下降,最终反映在器件的性能上的结果就是器件探测效率下降十几个百分点甚至更多。这对于追求高效性能的 SNSPD 来说无疑是不可接受的。为了验证本文设计的自对准封装结构是否也具有这种问题,我们设计了两组对照实验来研究自对准器件的稳定性。以下分别研究了 SNSPD 器件在升降温、插拔光纤情况下,器件效率的变化情况。

#### 3.3.1 升降温实验

选取四个器件,在保持其他外界条件不变的情况下,反复升降温四次,测得四次器件效率的波动情况,得到的数据如表 1 所示。其中 3 号器件经历了最多达到 10 次的升降温测试,测试结果仍在表格所给的误差范围内。

表 1 反复升降温条件下的实验结果

Table 1 Experimental results under the condition of repeated temperature rise and fall

Times	Result / %			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
1	87.00	86.20	80.40	81.20
2	86.40	85.80	80.80	81.90
3	86.40	86.40	81.00	82.00
4	87.30	87.10	80.20	81.60
Average value	86.78	86.38	80.60	81.68
Standard deviation	0.45	0.54	0.37	0.36

#### 3.3.2 插拔光纤实验

与升降温实验类似,也选取了四个器件,在保持其他外界条件不变的情况下,在器件恢复到常温后,重新插拔光纤再进行降温。测得四次器件效率的波动情况,得到的数据如表 2 所示。

表 2 重复插拔光纤条件下的实验结果

Table 2 Experiment results under the condition of repeated insertion and extraction of optical fibers

Times	Result / %			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
1	68.60	80.10	79.10	82.90
2	65.80	80.40	77.00	84.50
3	66.80	85.20	75.00	81.70
4	65.90	86.40	78.10	84.30
Average value	66.78	83.03	77.30	83.35
Standard deviation	1.30	3.24	1.76	1.31

### 3.4 实验结果分析

通过表 1 数据分析可知,升降温情况下器件效率值波动的标准差在 0.6% 以内,考虑到实际测试温度的波动以及光源标定的不确定性,我们可以认为在反复升降温的情况下,自对准封装的稳定性几乎不受影响。而通过表 2 可以发现插拔光纤对器件效率的影响较大,效率值波动标准差大部分在 1.80% 以内,最大标准差为 3.24%。可能的原因是光纤头直径本身精度为  $\pm 3 \mu\text{m}$ ,在插拔光纤的情况下光纤头的精度也会影响到器件与光纤的对准精度,使得效率出现一定的波动。总体来说,自对准器件相对于传统手动对光的铜模块封装,具有更好的稳定性和可重复性。

## 4 结 论

本文从超导纳米线单光子探测器封装的快速以及稳定耦合两个方面考虑设计了一种自对准封装结

构,制定并优化了自对准 SNSPD 的制备工艺,得到了探测效率最高达到 93.7% 的自对准 SNSPD。并在低温下进行重复性测试,验证了其稳定性,反复升降温的情况下器件效率值波动标准差在 0.60% 左右,反复插拔光纤的情况下器件效率值波动的标准差在 1.80% 以内,最大为 3.24%。说明了自对准封装具有良好的稳定性。为未来 SNSPD 的集成化和商业化提供了前期探索。

### 参 考 文 献

- [1] You L X. Recent progress on superconducting nanowire single photon detector [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2014, 44(3): 370-388.  
尤立星. 超导纳米线单光子探测技术进展 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(3): 370-388.
- [2] 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.
- [3] Yang X G, Liu Y, Lei H X, et al. An organic-inorganic broadband photodetector based on a single polyaniline nanowire doped with quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(34): 15529-15537.
- [4] Yao N, Yao Q, Xie X P, et al. Optimizing up-conversion single-photon detectors for quantum key distribution [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25123-25133.
- [5] Liu Y X, Fan Q, Li X Y, et al. Realization of silicon single-photon detector with ultra-low dark count rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(10): 1004001.  
刘岩鑫, 范青, 李翔艳, 等. 超低暗计数率硅单光子探测器的实现 [J]. *光学学报*, 2020, 40(10): 1004001.
- [6] Zhao C J, Li G H, Han Y, et al. Research progress in junction type organic photodetectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130001.  
赵成杰, 李国辉, 韩悦, 等. 结型有机光电探测器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130001.
- [7] Liu K B, Yang X H, He T T, et al. Indium phosphide-based near-infrared single photon avalanche photodiode detector arrays [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 220001.  
刘凯宝, 杨晓红, 何婷婷, 等. InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 220001.
- [8] Tang J, Li J X, Chen Q, et al. Surface plasmon enhanced silicon-based near-infrared photoconductive detector [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1113002.  
唐超, 李家祥, 陈沁, 等. 表面等离子激元增强硅基近红外光电导探测器 [J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1113002.
- [9] Reddy D V, Lita A E, Nam S W, et al. Achieving 98% system efficiency at 1550 nm in superconducting nanowire single photon detectors [C] // Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQO-11), August 4-8, 2019, Rochester, New York. Washington, D.C.: OSA, 2019: W2B.2.
- [10] 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.
- [11] Shibata H, Shimizu K, Takesue H, et al. Ultimate low system dark-count rate for superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3428-3431.
- [12] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, et al. Demonstrating sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(4): 250-255.
- [13] You L X. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673-2692.
- [14] Boaron A, Boso G, Rusca D, et al. Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 190502.
- [15] Xue L, Li Z L, Zhang L B, et al. Satellite laser ranging using superconducting nanowire single-photon detectors at 1064 nm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(16): 3848-3851.
- [16] Chen S J, Liu D K, Zhang W X, et al. Time-of-flight laser ranging and imaging at 1550 nm using low-jitter superconducting nanowire single-photon detection system [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3241-3245.
- [17] Li Z, Wu E, Pang C, et al. Multi-beam single-photon-counting three-dimensional imaging lidar [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10189-10195.
- [18] Kadin A M, Johnson M W. Nonequilibrium photon-induced hotspot: a new mechanism for photo detection in ultrathin metallic films [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(25): 3938-3940.
- [19] Semenov A, Engel A, Hübers H W, et al. Spectral cut-off in the efficiency of the resistive state formation caused by absorption of a single-photon in current-carrying superconducting nano-strips [J]. *The European Physical Journal B*, 2005, 47(4): 495-501.
- [20] Miller A J, Lita A E, Calkins B, et al. Compact

- cryogenic self-aligning fiber-to-detector coupling with losses below one percent[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9102-9110.
- [21] Esmail Z 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.
- [22] Hu P, Li H, You L X, et al. Detecting single infrared photons toward optimal system detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36884-36891.
- [23] Liu D K, Chen S J, You L X, et al. Fiber coupling of superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1496-1502.
- 刘登宽, 陈思井, 尤立星, 等. 超导纳米线单光子探测器的光耦合结构 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1496-1502.
- [24] Xu G B, Huang H, Zhan M H, et al. Experimental evaluation of inductively coupled plasma deep silicon etching[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(8): 832-835.
- 许高斌, 皇华, 展明浩, 等. ICP 深硅刻蚀工艺研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(8): 832-835.