

超导纳米线单光子探测器*

张蜡宝 康琳[†] 陈健 赵清源 郑涛 许伟伟 曹春海 金飏兵 吴培亨

(南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 南京 210093)

(2010年5月15日收到; 2010年6月6日收到修改稿)

利用磁控溅射、电子束光刻和反应离子刻蚀等微加工技术, 开展了超导纳米线单光子探测器(SNSPD)的研究. 通过对SNSPD的设计和制备工艺参数的优化, 成功制备出了高质量 SNSPD. 单光子检测实验表明, 制备的SNSPD对660 nm波长的光信号, 系统检测效率可达30%, 对1550 nm波长光信号, 最大系统检测效率为4.2%. 在平均暗计数小于10 c/s的情况下, 系统检测效率大于20% (660 nm)和3% (1550 nm).

关键词: 单光子, 氮化铌, 纳米线, 探测器

PACS: 85.25.Pb, 07.57.Kp, 85.60.Gz, 03.67.Hk

1. 引言

超导纳米线单光子探测器(Superconducting Nanowire Single Photon Detector, SNSPD)是一种利用超导纳米膜条进行光子检测的高灵敏光子探测器^[1]. 与现有商用单光子探测器相比^[2-5], SNSPD具有暗计数低、响应频谱宽、重复速度快等特点, 因此在量子信息^[6-11], 单光子源表征^[12,13], 集成电路检测^[14], 高速光通讯^[15]和分子荧光检测^[16]等领域具有重要的应用价值.

1990年, Kadin等人^[17]提出利用吸收光子后在二维超导体上形成的涡旋-反涡旋对(vortex-antivortex pairs, VAP)来检测红外光子的思想. 基于这个思想, Gupta等人^[18]提出氮化铌(niobium nitride, NbN)薄膜条纹的单光子探测器模型. Semenov等人^[19]提出给NbN薄膜条加一个偏置电流以辅助超导态的临界转变进而实现对单光子的检测. Gol'tsman等人^[1]设计了NbN超导纳米条的单光子探测实验. 他们利用宽200 nm, 长1 μm 的超导NbN薄膜条, 实现了对波长为810 nm的单光子信号的检测. 该研究小组^[20]通过改进器件结构, 将纳米条加工成覆盖20 μm^2 面积的曲折线结构, 提高了SNSPD探测器的光子耦合效率, 实现了从可见光到红外光波段的单光子探测.

目前的SNSPD主要采用3—6 nm的高质量NbN外延薄膜, 用微加工手段将薄膜刻蚀成曲折线结构, NbN纳米线宽度一般在100 nm左右. SNSPD工作在1.4—4.2 K的温度, 偏置在略低于临界电流的状态. 在没有光子入射时, 超导纳米条处于超导态, 当光子被NbN膜条吸收, 吸收光子处形成一个短暂的电阻态, 器件两端有一个电压脉冲输出. 通过对这个电压脉冲信号的计数实现对入射光子的检测.

SNSPD芯片的制备工艺复杂, 高质量超薄NbN薄膜的制备技术是SNSPD的基础. 目前能够独立制备SNSPD芯片的研究组寥寥可数. 莫斯科师范大学是最早开展SNSPD实验研究的小组, 技术最为成熟. 他们已向多个国家的研究小组提供探测器芯片. 另外还有日本NICT, 美国NIST和MIT等. 南京大学超导电子学研究所, 从2007年开始SNSPD的实验研究, 已经研制出从可见光到中红外波段的单光子探测器, 其探测效率、时间抖动等主要性能指标达到了国际主流水平.

本文中, 我们介绍利用NbN超薄超导薄膜设计和制备SNSPD的工艺技术, SNSPD器件的筛选方法和SNSPD的性能评价指标.

2. 器件制备与性能评价

超薄NbN薄膜是制备SNSPD的纳米线最常用

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2011CBA00200, 2007CB310404)和国家自然科学基金(批准号:10874074)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: kanglin@nju.edu.cn

的材料. 除 NbN 外, 也有一些小组探索 Nb^[21], NbTiN^[22,23], MgB2^[24,25], Mo-Re^[26] 等作为 SNSPD 的超导纳米线材料. 我们采用直流反应磁控溅射技术在 MgO 基片上生长了 3—6 nm 厚度的 NbN 薄膜, 4 nm, 5 nm 和 6 nm 厚的 NbN 薄膜的超导转变温度分别可达到 10.5 K, 12.0 K 和 14.4 K, NbN 超导薄膜的生长工艺条件请参阅文献[27]. 借助电子束曝光和反应离子刻蚀等微加工技术, 成功制备了用于不同波长光子检测的 SNSPD 芯片. 图 1 给出了制备 SNSPD 器件的主要工艺流程. 该过程包括薄膜生长、纳米线制备、电极制备等 12 个工艺步骤.

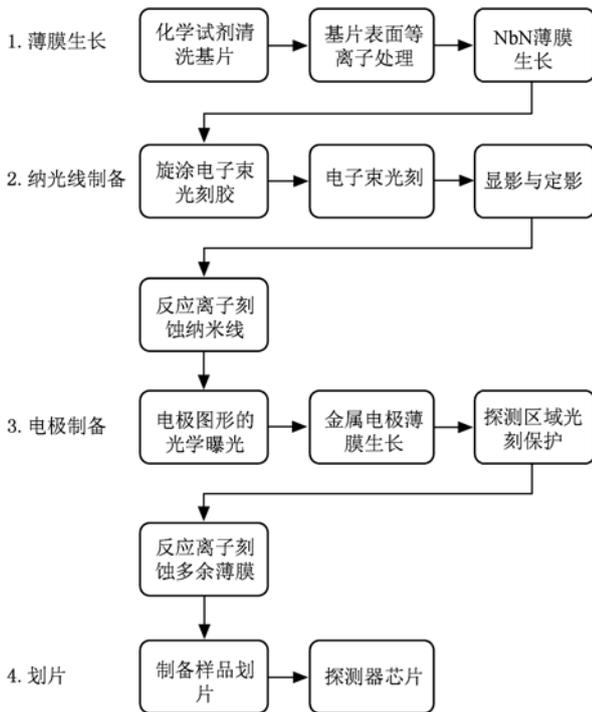


图 1 SNSPD 器件制备工艺流程图

2.1. 电子束光刻工艺优化

由于 MgO 基片不导电, 电子束光刻时电荷的堆积和电子背散射增强了邻近效应的影响. 因此, 要得到宽度均匀的 NbN 纳米线需要严格优化电子束光刻的条件. 实验中, 我们采用的电子束光刻胶是 PMMA495 (MicroChem 公司的产品). 通过优化曝光条件, 得到了多种宽度的纳米线条. 如图 2 给出了 50 nm NbN 线条在不同曝光剂量条件下的 SEM 照片. 图 2(a) 和 (b), 曝光剂量不足, 相邻两根纳米线条间没有曝透, 线条发生连接. 图 2(c) 的曝光剂量为 $400 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 线条边界清晰齐整. 随着曝光剂量

的增加, 纳米线之间间距逐渐增加, 直至出现纳米线断条到无法形成线条. 我们选择 $420 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的曝光剂量制备纳米线. 该剂量稍大于能够刻蚀出所设计图形的最小剂量, 即能保证获得所需图形, 又不残留光刻胶, 可以获得边缘齐整间距适当的纳米线条. 对于宽度大于 50 nm 的纳米的线条, 曝光条件相对要宽松些. 电子束曝光得到的只是光刻胶的图形, 要将图形转移到 NbN 薄膜上, 需要通过反应离子刻蚀 (RIE) 技术实现.

2.2. NbN 纳米线刻蚀

RIE 刻蚀 NbN 薄膜, 由于 NbN 薄膜的厚度只有 4 nm 左右, 为控制刻蚀速度和减小横向刻蚀, 我们采用 SF_6 和 CHF_3 的混合气体作为反应气体. 为保证 NbN 纳米曲折线条的宽度和边缘的平整度, PMMA 光刻胶的厚度选择为 60 nm, NbN 膜的厚度远小于 PMMA 膜. 因此, 可以通过设置一定的时间延迟, 来获得整齐清晰的 NbN 纳米线结构. 优化后的 RIE 工艺条件如表 1.

表 1 反应离子刻蚀的工艺条件

项目	数值
刻蚀气体	SF_6/CHF_3
气体流量	40SCCM/24SCCM
工作压强/Pa	4
刻蚀功率/W	80
刻蚀时间/s	12

通过电子束光刻和 RIE 工艺, 我们得到了 NbN 纳米线. 图 3 是制备的 NbN 纳米线的 SEM 图片. 图中列出了宽度分别为 100 nm 和 50 nm 的 NbN 纳米线, 纳米线的填充率约为 50%. 从图中可以看出, 制备的纳米线宽度均匀, 缺陷少. 通过优化工艺条件, 我们还制备了宽度从 50 nm 到 300 nm 不等的 NbN 纳米线.

2.3. 直流特性表征

器件直流特性是分析器件电学性质的重要途径. 实验中尽管我们优化了各种工艺条件, 但由于多种不可控因素, 比如: 基片表面的平整度、杂质、晶格缺陷等造成纳米薄膜的超导性能降低, NbN 薄膜的质量的差异, 光刻胶的不均匀, 光刻图形边沿的起伏, 温度湿度对显影和刻蚀速度的影响, 制备过程中清洗造成的损伤等等, 使得 SNSPD 芯片的成

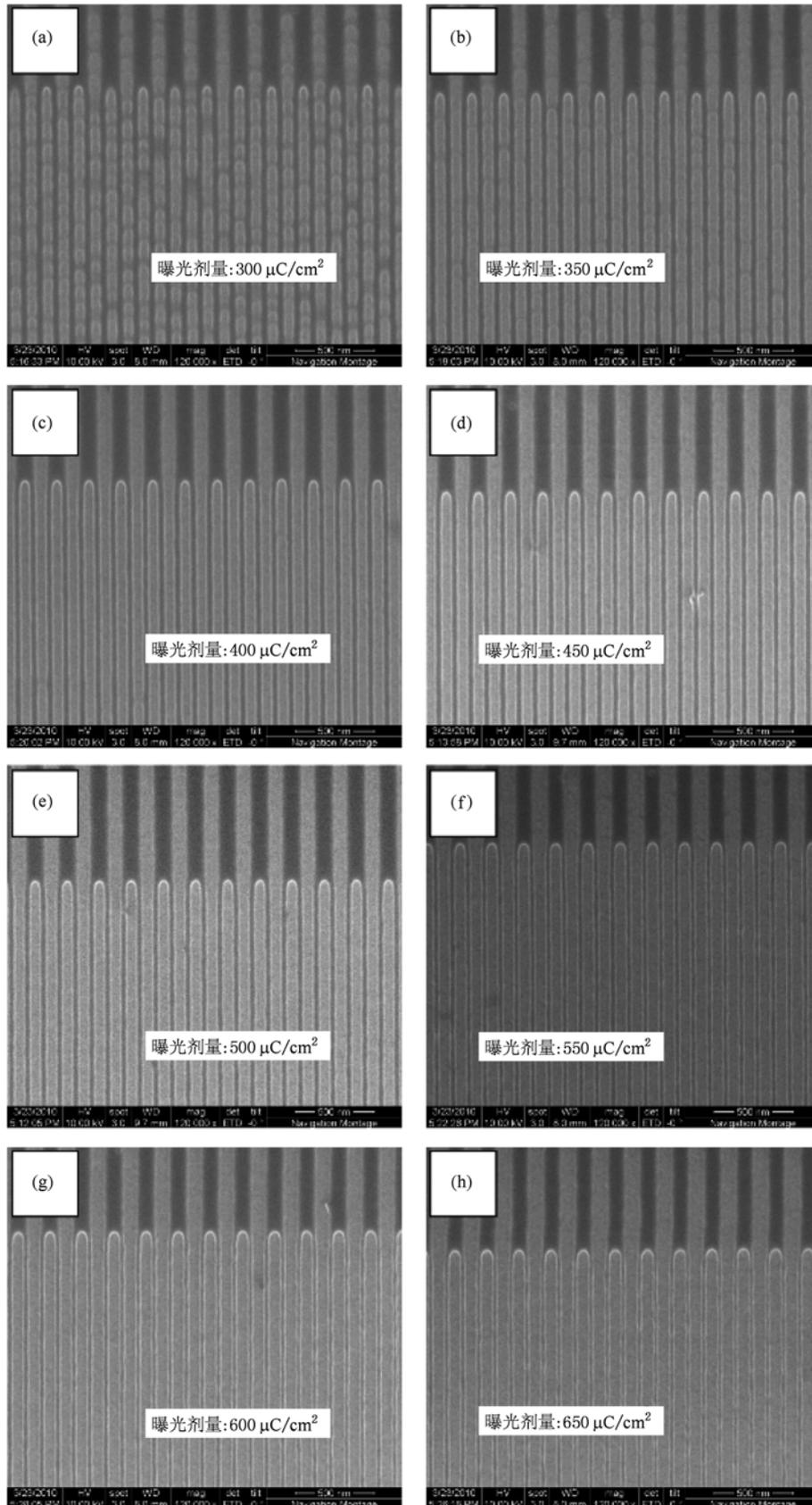


图2 电子束光刻 50 nm 纳米线的图形与曝光剂量的关系

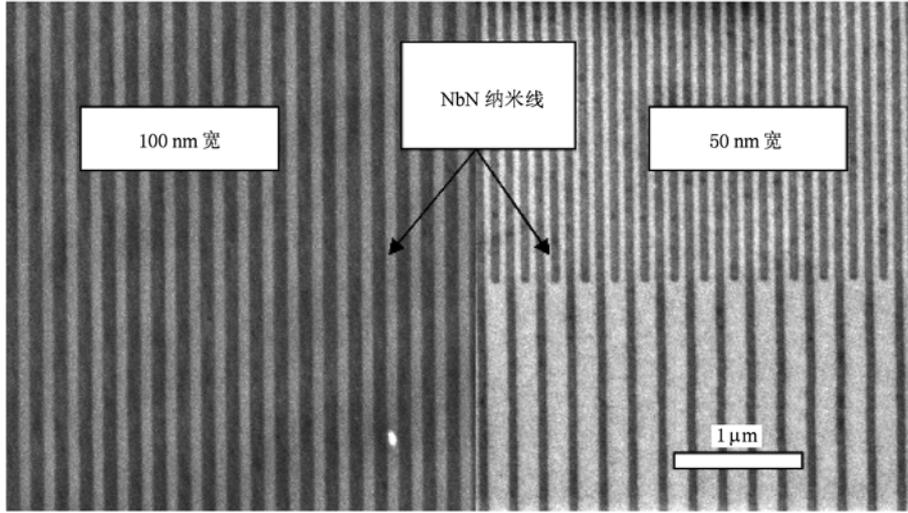


图3 实验上制备的 NbN 纳米线的 SEM 照片

品率很低. 为了得到高质量的器件, 必须对芯片进行筛选.

表2 制备器件的室温电阻(测量温度为 20°C, 器件中纳米线的宽度为 100 nm, 长度为 0.5 mm)

No.	701	702	703	704	705	706	707	708
R/Ω	1.58	1.49	1.93	∞	1.35	1.80	1.41	0.27

SNSPD 芯片的室温电阻是器件筛选的第一步, 剔除掉短路或者断路的芯片. 正常情况下, SNSPD 芯片纳米线的室温电阻在兆欧姆量级, 具体的大小和薄膜质量, 纳米线的长度和宽度等有关. 表 2 列出了同一批 SNSPD 芯片的电阻. 样品 704# 的电阻无穷大, 说明纳米线存在断点; 样品 708# 的电阻仅 0.27 MΩ, 明显偏低, 说明其纳米线之间存在短路,

因此不推荐再做后续分析研究. 其他样品的电阻偏差较小, 还需进一步通过 $I-V$ 曲线的测量判定.

图 4 给出了两个 SNSPD 芯片在 4.2 K 时的 $I-V$ 曲线和 SEM 照片. 这两个 SNSPD 芯片同批制备, 工艺条件完全相同, 其室温电阻分别为 2.8 MΩ 和 2.7 MΩ. 图 4(b) 样品的纳米线齐整, $I-V$ 曲线中分支清晰, 一致性好, 该样品的超导临界电流为 17 μA. 图 4(a) 样品的超导临界电流明显偏低, 且不存在分支. 从 SEM 照片可以发现样品中部分区域(椭圆部分)的纳米线结构极为不规则. 此区域中纳米线条的超导临界电流要远小于正常规整的纳米线条, 这是可能造成 $I-V$ 曲线没有明显的分支的主要因素. 实验经验表明, 类似图(a) $I-V$ 曲线的样品, 光子检测效率非常低. 因此, 此类芯片也不推荐进

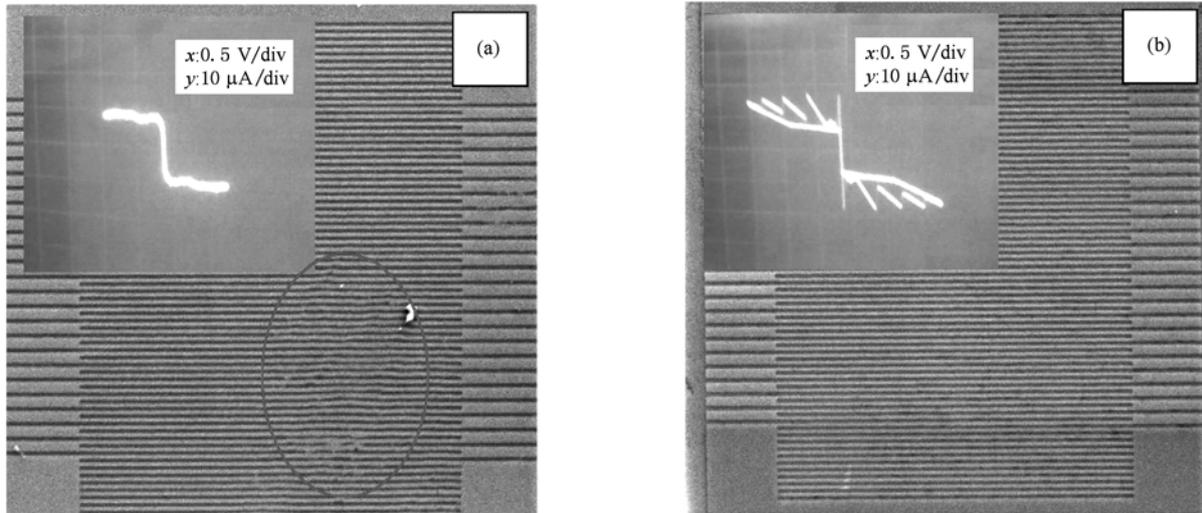


图4 存在缺陷的器件(a)和正常器件(b)的对比(插入图为器件在 4.2 K 时的 $I-V$ 曲线)

行下一步的性能测试.

通过 SSPD 芯片的正常态电阻和 I - V 曲线的分析和评估,我们可以筛选掉一些存在缺陷的芯片,对性能较好的芯片进行光子探测效率的表征.

2.4. 器件的封装

为了对 SNSPD 芯片进行光子效率的探测,需要将光子信号耦合到芯片的探测区域上.由于芯片的探测区域仅 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 左右,而且工作在低于 4.2 K 的温度环境.因此,器件封装是 SNSPD 的一个难点.我们自行设计和研制了 SNSPD 芯片的封装盒,如图 5.封装后的 SNSPD 通过 FC-PC 光纤接口和入射光信号连接,读出电信号可以通过 SMA 接头与同轴电缆连接至计数器,使用非常方便.光纤与芯片的探测区域的对准,可以通过封装盒侧边四周的四个螺钉在 X - Y 平面调节.调节对准后用低温胶将光纤位置固定.

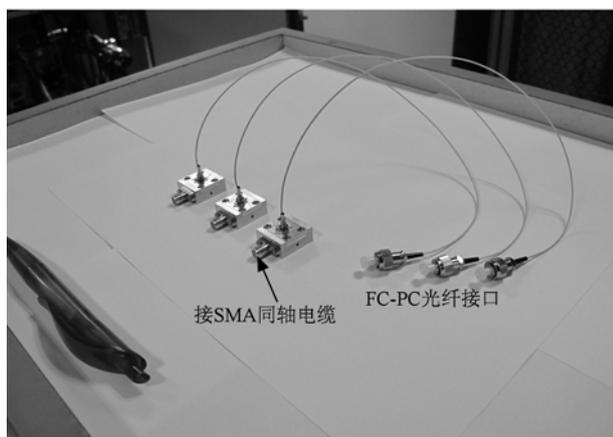


图 5 封装后的 SNSPD 探测器的光学照片

3. 系统效率与暗计数分析

制备和封装好的 SNSPD 可工作在液氮杜瓦和 GM 制冷机上.这里我们给出用 GM 制冷机(温度 3.4 K)作为冷媒来分析表征制备的 SNSPD 的系统检测效率和暗计数.测量光路和电路设置见文献 [27].图 6 是测量的一个 SNSPD 的系统检测效率和暗计数随偏置电流的关系,暗计数随偏置电流的增加而增加,在接近临界电流(17 μA)时达到最大值,约 700 Hz.对于短波长光子(404 nm 和 660 nm),系统效率随偏置电流增大而快速增加,并很快进入饱和状态,再继续增加偏置电流,系统效率不再增大.

我们制备的 SNSPD 对 404 nm 的光信号,最大的系统效率为 35%.对 660 nm 的光信号最大的系统效率为 30%.在暗计数小于 10 c/s 时,也可以得到 28% (404 nm) 和 20% (660 nm).对一些暗计数要求较高的应用,可以通过调低偏置电流来降低暗计数.

对于红外波段(1310 nm 和 1550 nm)的光信号,系统检测效率同样随偏置电流的增大而增加,但没有观察到明显的饱和现象.对 1550 nm 的光信号,我们的 SNSPD 最大的系统效率为 4.2%.总的来说,光子能量越大,系统效率越高.这一规律与国际上其他研究小组的研究结果^[28]一致.

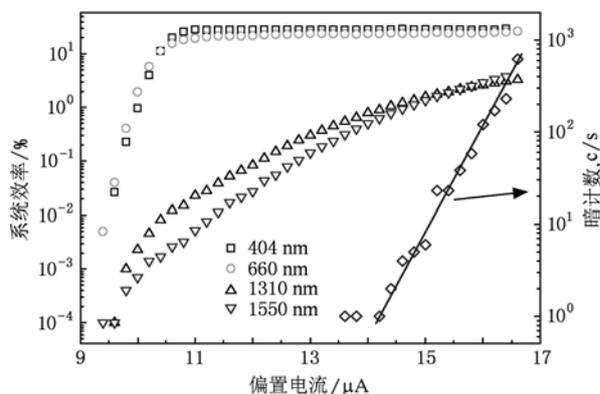


图 6 系统效率和偏置电流的关系

表 3 实验上得到的 SNSPD 的系统效率

探测器型号	系统效率/%	DCR / (c/s)	温度/K
InGaAs/InP ^[29]			
ID Quantique	10 (1550 nm)	10000	260
SNSPD ^[30] (Moscow)	3 (1550 nm)	10	2
SNSPD ^[28] NICT	3.5 (1550 nm)	100	2.9
SNSPD (本工作)	3 (1550 nm)	10	3.4

表 3 给出了我们研制的 SNSPD 的性能参数与半导体单光子探测器和国际上一些研究小组的研究结果的比较.我们研制的 SNSPD 的主要性能参数达到了国际主流水平.和半导体单光子探测器相比,SNSPD 具有非常低的暗计数,但系统效率偏低.主要原因是 SNSPD 的 NbN 薄膜较薄,仅几个纳米,多数光子被反射或透射丢失掉,光子的吸收效率很低.因此,进一步优化 SNSPD 探测器的结构,提高光

子被吸收的概率,提高系统检测效率,是今后 SNSPD 研究的重要方向。

4. 结 论

综上所述,通过大量的实验研究,我们研制了

SNSPD 器件,对 SNSPD 的结构和制备工艺进行了优化设计,最终获得高质量的 SNSPD。研制的 SNSPD 最高系统效率可达 30% (660 nm) 和 4.2% (1550 nm); 在平均暗计数小于 10 c/s 的情况下,系统效率可达 20% (660 nm) 和 3% (1550 nm)。同时,我们还给出了对 SNSPD 器件进行筛选和评估的方法。

- [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] Wei Z J, Li K Z, Zhou P, Wang J D, Liao C J, Guo J P, Liang R S, Liu S H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4142
- [3] Liu Y, Wu Q L, Han Z F, Dai Y M, Guo G C 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 252
- [4] Chang J T, Wu L A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1132 (in Chinese) [常君弢、吴令安 2003 物理学报 **52** 1132]
- [5] Wang J D, Wu Z H, Zhang B, Wei Z J, Liao C J, Ju S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5620 (in Chinese) [王金东、吴祖恒、张兵 2008 物理学报 **57** 5620]
- [6] Takesue H, Nam S W, Zhang Q, Hadfield R H, Honjo T, Tamaki K, Yamamoto Y 2007 *Nat. Photonics* **1** 343
- [7] Rosenberg D, Peterson C G, Harrington J W, Rice P R, Dallmann N, Tyagi K T, McCabe K P, Nam S, Baek B, Hadfield R H, Hughes R J, Nordholt J E 2009 *New J. Phys.* **11** 045009
- [8] Stucki D, Walenta N, Vannel F, Thew R T, Gisin N, Zbinden H, Gray S, Towery C R, Ten S 2009 *New J. Phys.* **11** 075003
- [9] Hadfield R H, Habif J L, Schlafer J, Schwall R E, Nam S W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 031109
- [10] Zhang X Z, Gong W G, Tan Y G, Ren Z Z, Guo X T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2143
- [11] Quan D X, Pei C X, Liu D, Zhao N 2010 *Acta Phys Sin.* **59** 2493 (in Chinese) [权东晓、裴昌幸、刘丹 2010 物理学报 **59** 2493]
- [12] Hadfield R H, Stevens M J, Mirin R P, Nam S W 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 7
- [13] Hadfield R H, Stevens M J, Mirin R P, Nam S W 2007 *Journal of Applied Physics* **101** 103104
- [14] Zhang J, Boiadjieva N, Chulkova G, Deslandes H, Gol'tsman G N, Korneev A, Kouminov P, Leibowitz A, Lo W, Malinsky R, Okunev O, Pearlman A, Slys W, Smirnov K, Tsao C, Verevkin A, Voronov B, Wilsher K, Sobolewski R 2003 *Electron. Lett.* **39** 1086
- [15] Robinson B S, Kerman A J, Dauler E A, Barron R O, Caplan D O, Stevens M L, Carney J J, Hamilton S A, Yang J K W, Berggren K K 2006 *Opt. Lett.* **31** 444
- [16] Fujiyoshi S, Fujiwara M, Matsushita M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 4
- [17] Kadin A M, Leung M, Smith A D 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 3193
- [18] Gupta D, Kadin A M 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 4487
- [19] Semenov A D, Gol'tsman G N, Korneev A A 2001 *Physica C* **351** 349
- [20] Verevkin A, Zhang J, Sobolewski R, Lipatov A, Okunev O, Chulkova G, Korneev A, Smirnov K, Gol'tsman G N, Semenov A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4687
- [21] Annunziata A J, Santavicca D F, Chudow J D, Frunzio L, Rooks M J, Frydman A, Prober D E 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 327
- [22] Miki S, Takeda M, Fujiwara M, Sasaki M, Otomo A, Wang Z 2009 *Appl. Phys. Express* **2**
- [23] Dorenbos S N, Reiger E M, Perinetti U, Zwiller V, Zijlstra T, Klapwijk T M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 131101
- [24] Shibata H, Asahi M, Maruyama T, Akazaki T, Takesue H, Honjo T, Tokura Y 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 358
- [25] Portesi C, Borini S, Taralli E, Rajteri M, Monticone E 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 034006
- [26] Seleznev V A, Tarkhov M A, Voronov B M, Milostnaya, II, Lyakhno V Y, Garbuz A S, Mikhailov M Y, Zhigallina O M, Gol'tsman G N 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 6
- [27] Zhang L, Zhao Q, Zhong Y, Chen J, Cao C, Xu W, Kang L, Wu P, Shi W 2009 *Applied Physics B: Lasers and Optics* **97** 187
- [28] Miki S, Fujiwara M, Sasaki M, Baek B, Miller A J, Hadfield R H, Nam S W, Wang Z 2008 *Applied Physics Letters* **92** 061116
- [29] Thew R T, Stucki D, Gautier J D, Zbinden H, Rochas A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91**
- [30] Divochiy A, Marsili F, Bitauld D, Gaggero A, Leoni R, Mattioli F, Korneev A, Seleznev V, Kourova N, Minaeva O, Gol'tsman G, Lagoudakis K G, Benkhaoul M, Levy F, Fiore A 2008 *Nat. Photonics* **2** 377

Fabrication of superconducting nanowire single-photon detector*

Zhang La-Bao Kang Lin[†] Chen Jian Zhao Qing-Yuan Jia Tao Xu Wei-Wei
Cao Chun-Hai Jin Biao-Bing Wu Pei-Heng

(*Department of Electronic Science and Engineering of Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(Received 15 May 2010; revised manuscript received 6 June 2010)

Abstract

In this paper, the fabrication details and optimization of micro-fabrication process are presented for developing superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPD). Besides, the device failure analysis is also introduced. With those methods, we successfully fabricated high-quality SNSPDs whose maximum system efficiencies were up to 30% for 660 nm wavelength and 4.2% for 1550 nm wavelength according to the single-photon detection experiment. At the dark count rate of 10 c/s, the detection efficiencies were 20% (660 nm) and 3% (1550 nm) with the SNSPD fabricated with above mentioned methods.

Keywords: single photon, niobium nitride, nanowire, detector

PACS: 85.25.Pb, 07.57.Kp, 85.60.Gz, 03.67.Hk

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2011CBA00200, 2007CB310404) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10874074).

[†] Corresponding author. E-mail: kanglin@nju.edu.cn