

文章编号 1004-924X(2013)06-1496-07

# 超导纳米线单光子探测器的光耦合结构

刘登宽<sup>1,2</sup>, 陈思井<sup>1,2</sup>, 尤立星<sup>1\*</sup>, 何宇昊<sup>1,2</sup>, 张 玲<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. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高超导纳米线单光子探测系统(SNSPD)的探测效率, 搭建了超导纳米线单光子探测系统, 研究了该系统的光耦合结构及该结构随温度降低而发生的变化。首先, 测量了 SNSPD 在不同电流下的量子效率, 确定了器件的性能。然后, 提出了两种不同的光纤直接对准的器件封装方法, 这些方法可以在室温下自主控制光纤端面与器件表面的距离(gap)。考虑封装材料的热胀冷缩, gap 在温度变化时有明显的变化, 研究了温度变化对 gap 的影响。最后, 提出通过改变入射光的波长来观察器件表面反射光光强的周期性波动, 从而精确测量不同温度下 gap 的大小。实验结果表明, 对于两种不同的光耦合结构, gap 在温度降低 270 K 以后分别减小了 4.1  $\mu\text{m}$  和 17  $\mu\text{m}$ 。理论计算和实验数据基本吻合, 可为未来器件封装和新型封装结构的设计提供参考依据。

**关键词:** 超导单光子探测; 量子效率; 光耦合; 降温形变

**中图分类号:** TP212.14; O511.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1496

## Fiber coupling of superconducting nanowire single-photon detectors

LIU Deng-kuan<sup>1,2</sup>, CHEN Si-jing<sup>1,2</sup>, YOU Li-xing<sup>1\*</sup>, HE Yu-hao<sup>1,2</sup>, ZHANG Ling<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. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn*

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of the package and fiber coupling of a Superconducting Nanowire Single-photon Detector (SNSPD), the SNSPD was successfully built up in our laboratory. Experiments show that the quantum efficiencies of the detector under different light wavelengths are 6% @ 1310nm and 3% @ 1550nm when the dark count rate is 100 Hz. Then, as the distance (gap) between SNSPD and optical fiber would be changed due to the thermal stress during cooling, and would cause a misalignment, two kinds of fiber coupling methods to modulate the gap at room temperature were proposed. Finally, by altering the wavelength of the input light, the exact values of the gap at different temperatures were measured and then the influence of temperature on the gap were figured out by an experiment. The experimental results indicate that decreases of the gap for the two

收稿日期: 2013-01-02; 修订日期: 2013-02-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 91121022); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CBA00202); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA010802)

packages are  $4.1 \mu\text{m}$  and  $17 \mu\text{m}$  when the temperature decreases 270 K. Based on the analysis of package material and structure, the gaps at both room and low temperature were calculated theoretically. The result fits well with that of the experiments and it may offer some references to the design of new package and fiber coupling in the future.

**Key words:** Superconducting Nanowire Single-photon Detection (SNSPD); quantum efficiency; fiber coupling; temperature decrease

## 1 引言

超导纳米线单光子探测(Superconducting Nanowire Single-photon Detectors, SNSPD)是一种新型的单光子探测技术,可实现对从可见光到近红外光波段的单个光子探测<sup>[1]</sup>,相对于传统的半导体单光子探测器件,具有量子效率高( $>50\%$ )<sup>[2]</sup>、计数率高( $>1 \text{ GHz}$ )<sup>[3]</sup>、暗计数低( $<100 \text{ Hz}$ )<sup>[4]</sup>、时间抖动小( $\sim 30 \text{ ps}$ )<sup>[5]</sup>等明显的优势。这些特性使得 SNSPD 在多个领域有重要的应用,例如量子密钥分发、天文、高能物理、大分子荧光光谱、芯片无损检测<sup>[6-9]</sup>等。此外, SNSPD 还可能被用来进行单电子以及单胞质的检测。

SNSPD 是基于超薄 NbN 超导薄膜的纳米线条结构,其工作的基本原理是超薄超导材料纳米线条的热点(Hot Spot)效应<sup>[10]</sup>。将超导纳米线的电流偏置在小于但非常接近其临界电流,当一个光子打到纳米线条上后,由于(近红外波段)单个光子的能量比超导材料的能隙高  $2\sim 3$  个数量级,一个光子就可以拆散大量的库珀对,从而形成大量的热电子(Hot Electron),导致了“hot spot”的形成,使得热点附近的纳米线条从超导态进入电阻态,在器件两端产生一个快速电压信号。由于超导材料的热弛豫时间非常短,当 SNSPD 接收到单个光子后,热电子的能量可以通过衬底和热点附近的纳米线条弛豫出去,使“hot spot”温度迅速降低,失超的纳米线条重新回到超导态,器件就可以接收下一个光子。

判断 SNSPD 器件性能的核心指标之一是其量子效率(Quantum Efficiency, QE),即单位时间内接收到的光响应脉冲数与单位时间内入射光子数的比例。影响 QE 的因素主要有三个方面:偏置电流、入射光波长和入射光耦合效率。偏置电流越高,器件对光子更敏感, QE 越高。单个光子的能量与其波长成反比,所以入射光的波长越短,

QE 越高。入射光的耦合效率是指入射光从光纤尾端出来后入射到器件上的光斑与器件有效区域的重合程度。入射光波长为  $1550 \text{ nm}$  时,实验中一般使器件偏置在其临界电流的  $95\%$  左右,在合理的暗计数范围内保持较高的量子效率。对于固定的偏置电流和入射光波长,入射光的耦合效率对器件的 QE 起着至关重要的作用。

本文介绍了以 NbN-SNSPD 为核心的实验室超导单光子探测系统,用两种不同的光耦合结构对器件进行封装,并分别测量了常温和低温下的光纤端面到器件表面的距离(gap),分析和计算了 gap 变化的起因,理论和实验具有很好的一致性,对未来进一步改进光耦合设计结构,提高入射光的耦合效率有很好的参考意义。

## 2 SNSPD 器件与系统

使用来自日本 NICT (National Institute of Information and Communications Technology) 制备的 SNSPD 器件,采用曲折纳米线结构,线条宽度和间隔为  $100 \text{ nm}$ ,有效区域的面积为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ,其超导临界温度为  $8.5 \text{ K}$ ,超导临界电流在  $4.2 \text{ K}$  时约为  $20 \mu\text{A}$ <sup>[11]</sup>。作为典型的低温超导材料, NbN 相比于以钨作为超导敏感层的转变沿传感器(TES)单光子探测器在工作条件要求上有着明显的优势,可以很容易通过液氮制冷或氦气循环压缩制冷的方式达到很好的工作状态。

成功搭建了以 SNSPD 器件为核心的超导单光子探测系统,其结构如图 1 所示,通过 G-M 闭合循环制冷机,使器件的最低工作温度达到  $2.7 \text{ K} \pm 20 \text{ mK}$ 。利用隔离电压源给器件提供稳定的电流偏置,电路中串联了一个阻值为  $10 \text{ K}$  的电阻,很大的串联电阻减小了电路的扰动和器件电阻可能存在的不稳定对偏置电流的影响,保证了器件工作在近似恒流状态。偏置电流通过偏置树(Bias-Tee)的直流端和阻抗为  $50 \Omega$  的同轴电缆

后流过器件。实验中使用 C10196 皮秒激光器，配有有 1 310 和 1 550 nm 两个波长的激光头，最高重复频率可达 100 MHz，通过可调衰减器 WX-FOFVA3100 进行衰减，针对不同的波长衰减到不同的功率，保证单光子入射到器件上。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(Tek DSA71254)观察时域脉冲波形或利用计数器(SR400)进行计数。

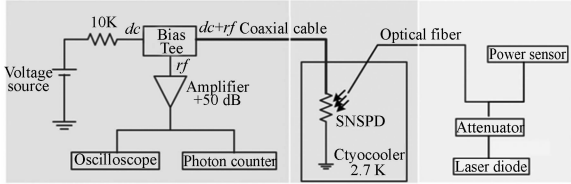


图 1 实验室超导单光子探测系统示意图

Fig. 1 Diagram of SNSPD system in laboratory

图 2 所示为我们目前使用的 SNSPD 器件的典型工作性能，在暗计数率为 100 Hz 时，1 310 和 1 550 nm 波长对应的量子效率分别为 6% 和 3%，此时的偏置电流为  $0.92 I_c$ ， $I_c$  为器件的临界电流。

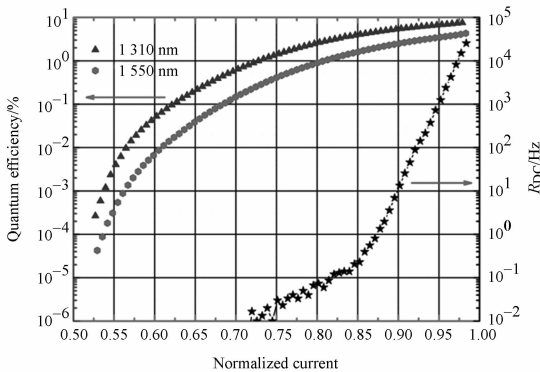


图 2 超导单光子探测器的量子效率和暗计数率

Fig. 2 QE and RDC curves of SNSPD

### 3 两种光耦合结构及器件封装

为了对 SNSPD 进行方便和精确的测量，设计了两种不同的器件封装方法，并用相应的光纤与之匹配。图 3 所示为两种不同的器件封装方法，封装盒由盖子和底座两部分组成，在盒子正中央打了直径为 1.3 mm 的通孔，直径为 1.25 mm 的光纤头从盖子上的孔穿过后靠近到器件的上表

面，但是不能使光纤的端面与器件接触以防止磨损器件。在光纤与孔的缝隙中放入蜡，然后使蜡融化后凝固，就可以把光纤很好地固定在盖子上。衬底通过少量的蜡固定在底座的观察孔的正上方，并通过 Wire-bonding 把器件的正负极连接到封装盒的 SMA 接头上，与外围的偏置电路形成回路。第一种封装方法(图 3a)虽然操作简单，但是有两个明显的缺点，一是对光的过程中如果光纤没固定紧就可能会松动而碰到器件，二是采用前端材料是玻璃的光纤，多次冷热循环后玻璃与光纤结合处的胶容易脱落，造成光纤损坏。为了解决这些问题，对封装盒进行了改进，在盖子上磨出一个方形的凹槽，并且采用带有金属环的陶瓷头光纤，很好地解决了上面的问题，如图 3(b) 所示。

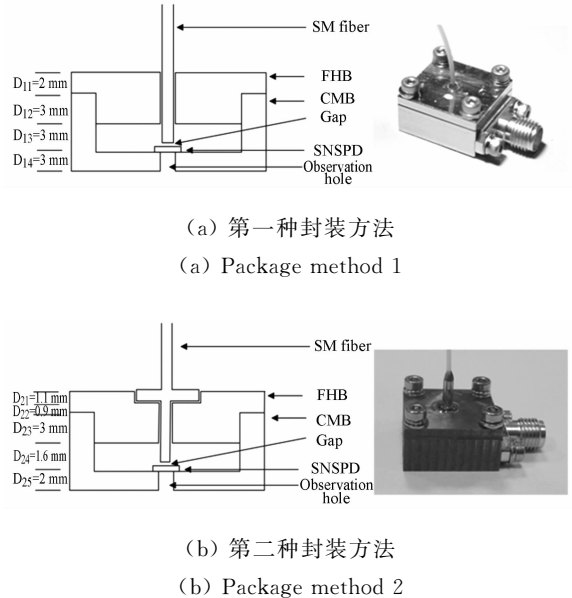


图 3 两种不同的器件封装方法

Fig. 3 Structures and photos of two package methods

## 4 Gap 的实验测量与计算

### 4.1 实验

光纤尾端与器件表面的距离称为 gap，gap 的大小直接决定了器件有效面积内能接受到的光效率，对系统 QE 有重要的影响，因此，对 gap 在室温及低温下的变化必须有一个定量的分析。为了准确地测量 gap，对入射光在光纤与器件之间的传播路径及 gap 计算的原理做了分析，如图 4 所示。当入射光射到光纤的最下端表面、器件的上

表面和衬底的下表面后都会有一部分光被反射回来,反射光再进入光纤,因为各个反射光之间有光程差,光纤端面的反射光(反射光 1)和器件表面的反射光(反射光 2)的光程差为两倍的 gap 的大小,而反射光 3 的强度相比于 1、2 来说比较微弱,在测量中可忽略。当不断地改变入射光的波长时,如果光程差为某个特定波长的整数倍,反射光功率由于反射光 1 和反射光 2 的叠加可以处于对应的最大值(波峰)和最小值(波谷)。通过改变波长对测得波峰和波谷的变化的分析,便可以获得 gap 值。

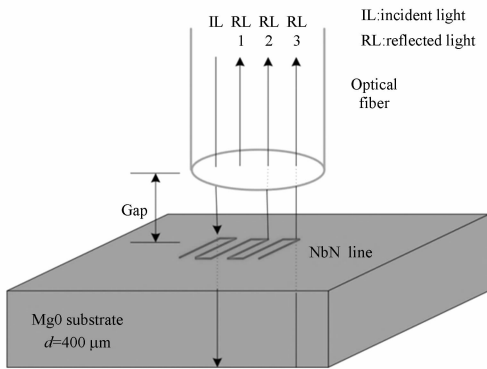


图 4 SNSPD 光的入射和反射示意图

Fig. 4 Diagram of incident and reflected lights

假设波长为  $\lambda_1$  时反射光功率处于最大值,临近的反射光功率最小值位于波长为  $\lambda_2$  处,(设  $\lambda_1 > \lambda_2$ ),  $G$  为 gap 的大小,则:

$$\begin{cases} 2G = n\lambda_1 \\ 2G = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda_2 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$$

对(1)进行化简,得:

$$G = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{4\Delta\lambda}. \quad (2)$$

基于上面的分析,在实验室中搭建了以 Aglient 光测量设备为核心的测试系统,主要包括可变波长光源(81980A)、光衰减器(81570)、光功率计(81634B)和光学环形器,如图 5 所示,光学环形器是三端口器件,光只能沿一个方向传播。信号若从端口 1 输入,则从端口 2 输出;若从端口 2 输入,则将从端口 3 输出,其输出损耗可以忽略不计。光从端口 2 输入时,从端口 1 输出时损耗很大,同样光从端口 3 输入时,从端口 1、2 中输出时损耗也很大。

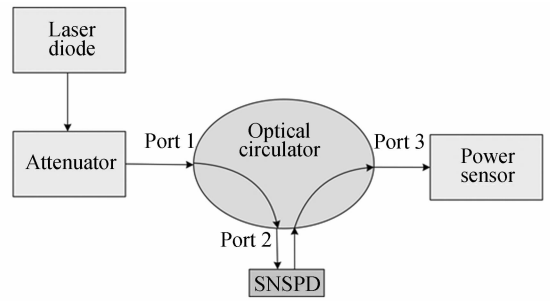


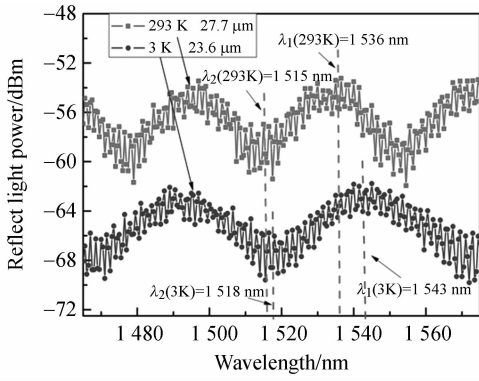
图 5 Gap 测量的示意图

Fig. 5 Sketch map of gap measurement system

通过 Labview 程序控制光源(81980A)输出一定功率的连续光,光功率的大小原则上并不影响 gap 的测量。但是为了跟实际单光子测量时的光功率更加接近,光从光源出射后经过了衰减器(81570)进行功率的衰减,本实验中把入射光的功率控制在  $-50$  dBm 左右,光学环形器的 1 号口接到衰减器的输出口,环形器的 2 号口接到已进行光耦合的光纤上,把光射入到器件的表面,各个表面的反射光通过环形器的 3 号口接入到光功率计(81634)进行测量,不断改变入射光的波长并测量相应的反射光功率,就可以得到一组类似于正弦曲线的点,读出曲线中波峰或者波谷所对应的波长,代入式(2)进行计算,就可以算出 gap 的具体结果。

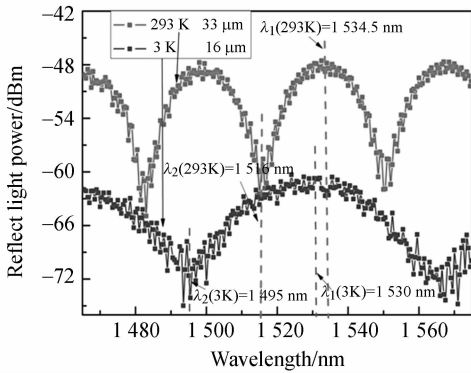
图 6(a)所示为第一种封装方法在常温(293 K,上面的曲线)和低温下(3 K,下面的曲线)的反射光功率与入射光波长的关系,其中,纵坐标为一个相对值,在 gap 的计算中并没有实际的意义,为了能够更清晰地显示两条曲线的差异,我们把常温的反射光功率的值加上了 12 dBm,使两条曲线的纵坐标不重合。读出图中大包络中任一波谷及其邻近的波峰处的波长值,带入式(2),可以计算得 gap 分别为  $27.7$  和  $23.6 \mu\text{m}$ ,在温度下降的过程中一共减小了  $4.1 \mu\text{m}$ 。同理,图 6(b)为第二种封装方法测得的曲线,常温和低温下的 gap 分别为  $33$  和  $16 \mu\text{m}$ ,一共减小了  $17 \mu\text{m}$ 。对于两种不同的封装方法,虽然只是在盖子上做了一些很小的改变,但是对 gap 的影响是不同的,关键在于光纤与盖子的固定点的位置有了很大改变。

图 6 中大包络中包含了很多小的周期性振荡,这是由于有一部分光穿过器件的有效区域后入射到衬底,又从衬底的下表面被反射回来,由于



(a) 第一种封装方法 gap 的变化

(a) Comparison of gap for the first way



(b) 第二种封装方法 gap 的变化

(b) Comparison of gap for the second way

图 6 两种封装方法常温 and 低温 gap 的比较

Fig. 6 Comparison of gaps at room temperature and low temperature

衬底的厚度比 gap 大很多,所以就形成了所测量到的反射光中振幅较小的周期性振荡。根据振荡的周期,利用与 gap 计算相同的公式,可以算出衬底的厚度为  $402 \mu\text{m}$ ,跟实际的衬底厚度( $400 \mu\text{m}$ )一致。

## 4.2 计算

为了从理论上解释 gap 在常温和低温下变化的原因,对两种光耦合方式进行了进一步分析,第一种封装方法可以直接调节光纤的位置使 gap 达到理想的距离,第二种封装方法可以通过在盖子和底座之间垫不同厚度的垫片的方法来控制 gap 的大小。整个封装盒的材料都是紫铜,虽然紫铜凭借其在低温下良好的导热和导电效果而在各个低温试验中被广泛使用<sup>[12]</sup>,但是随着温度的改变,紫铜会有很大的热膨胀系数,导致了整个封装盒在温度变化时发生明显的形变。紫铜在任意温

度区间的线膨胀系数为<sup>[13]</sup>:

$$\alpha_{T_1 \rightarrow T_2} = \Delta L/L \Big|_{T_1}^{T_2} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha dT \approx \gamma \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = \gamma \left[ \int_0^{T_2} C_V dT - \int_0^{T_1} C_V dT \right], \quad (3)$$

式中: $\alpha$ 为紫铜的热膨胀系数, $T_1$ 为初始温度, $T_2$ 为变化后的温度, $\gamma$ 为格林乃森系数(Grüneisen parameter)。

实验中,紫铜从室温 293 K 降到 3 K 的线膨胀系数为:

$$\alpha_{293 \rightarrow 3} = \Delta L/L \Big|_{293}^3 = -0.33\% . \quad (4)$$

负数表示紫铜是收缩的。光纤头和衬底随温度的变化也会产生相应的热膨胀, $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgO}$  的常温线膨胀系数分别为  $-0.015\%$  和  $-0.39\%$ ,影响的长度分别为 0.4 和 1.6 mm,对封装盒的进一步分析可知,光纤头和衬底在低温下的收缩会使 gap 变大。

对于第一种封装方法,光纤通过蜡固定在盖子通孔的缝隙中,对 gap 有影响的部分是盖子的下部(图 3a 中  $D_{12}$ )和底座的上部(图 3a 中  $D_{12}$  和  $D_{13}$ ),盖子下部的  $D_{12}$  随温度的降低向上收缩使 gap 变大,底座上部的  $D_{12}$  和  $D_{13}$  随温度的降低向下收缩使 gap 变小,抵消以后对 gap 有影响的只是  $D_{13}$ ,当温度从 293 K 降到 3 K 时,gap 总的变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= D_{\text{copper}} \times \alpha_{\text{copper}} - D_{\text{SiO}_2} \times \alpha_{\text{SiO}_2} - D_{\text{MgO}} \times \alpha_{\text{MgO}} = \\ &= D_{13} \times \alpha_{293 \rightarrow 3} - D_{\text{SiO}_2} \times \alpha_{\text{SiO}_2} - D_{\text{MgO}} \times \alpha_{\text{MgO}} = \\ &= -3.8 . \end{aligned} \quad (5)$$

对于第二种封装方法,光纤通过蜡固定在盖子的上部,对 gap 有影响的部分是盖子的下部(图 3b 中  $D_{22}$ )和底座的下部(图 3b 中  $D_{23}$  和  $D_{24}$ ), $D_{22}$  随温度的降低向上收缩使 gap 变小,与第一种封装方法类似, $D_{23}$  和  $D_{24}$  随温度的降低向下收缩使 gap 变小,整体效果是  $D_{22}$ 、 $D_{23}$  和  $D_{24}$  都影响 gap 的变化,当温度从 293 K 变化到 3 K 时,gap 的变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta d_2 &= D_{\text{copper}} \times \alpha_{\text{copper}} - D_{\text{SiO}_2} \times \alpha_{\text{SiO}_2} - D_{\text{MgO}} \times \alpha_{\text{MgO}} = \\ &= (D_{22} + D_{23} + D_{24}) \times \alpha_{293 \rightarrow 3} - D_{\text{SiO}_2} \times \alpha_{\text{SiO}_2} \\ &= -16.2 . \end{aligned} \quad (6)$$

把上面的计算结果与 4.1 中的实验数据做比较,发现理论计算与实验数据基本吻合,可以为未来器件封装和新型封装结构的设计提供参考依据。

## 5 结 论

本文从超导单光子探测器的原理出发,介绍了实验室 SNSPD 的测试系统以及目前器件的性能。通过对两种不同的器件封装方法的介绍和比

较,强调了光耦合效率对探测效率至关重要的影响,分析了常温和低温下 gap 的变化,对于两种不同的封装方法,在降温过程中 gap 的分别减小了 4.1 和 17  $\mu\text{m}$ 。实验结果证明,测量结果与理论推导结果完全吻合,对未来 SNSPD 器件的封装方法的改进有一定的参考意义。

### 参考文献:

- [1] GOLTSMAN G N, OKUNEV O, CHULKOVA G, *et al.*. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(6): 705-707.
- [2] HU X L, DAULER E A, MOLNAR R J, *et al.*. Superconducting nanowire single-photon detectors integrated with optical nano-antennae [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(1): 17-31.
- [3] AKHLAGHI M K, MAJEDI A H. Gated mode superconducting nanowire single photon detectors [J]. *Opt. Express.*, 2012, 20(2): 1608-1616.
- [4] YAMASHITA T, MIKI S, MAKISE K, *et al.*. Origin of intrinsic dark count in superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(16): 161105-1-3.
- [5] COLLINS R J, HADFIELD R H, FERNANDEZ V, *et al.*. Low timing jitter detector for gigahertz quantum key distribution [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(3):180-181.
- [6] LIU Y, CHEN T Y, WANG J, *et al.*. Decoy-state quantum key distribution with polarized photons over 200 km [J]. *Opt. Express.*, 2010, 18(8): 8587-8594.
- [7] TAKESUE H, NAM S W, ZHANG Q, *et al.*. Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors [J].

*Nat. Photonics.*, 2007, 1(6): 343-348.

- [8] KORNEEV A, LIPATOV A, OKUNEV O, *et al.*. GHz counting rate NbN single-photon detector for IR diagnostics of VLSI CMOS circuits [J]. *Microelectron. Eng.*, 2003, 69(2-4): 274-278.
- [9] HADFIELD R H, HABIF J L, SCHLAFFER J, *et al.*. Quantum key distribution at 1550 nm with twin superconducting single-photon detectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(24): 241129-1-3.
- [10] SEMENOV A, ENGEL A, HUBERS 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]. *Eur. Phys. J. B.*, 2005, 47(4): 495-501.
- [11] MIKI S, FUJIWARA M, SASAKI M, *et al.*. Large sensitive-area NbN nanowire superconducting single-photon detectors fabricated on single-crystal MgO substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(6): 061116-1-3.
- [12] ORGIAZZI J L F X, MAJEDI A H. Robust packaging technique and characterization of fiber-pigtailed superconducting NbN nanowire single photon detectors [J]. *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, 2009, 19(3): 341-345.
- [13] EKIN J. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements* [M]. USA: Oxford University Press, 2006.

### 作者简介:



刘登宽(1986—),男,江苏盐城人,博士研究生,2009年于南京大学获得学士学位,主要从事超导纳米线单光子探测器的特性研究。E-mail: liudk\_nju@mail.sim.ac.cn



陈思井(1987—),男,湖北仙桃人,博士研究生,2008年于华中科技大学获得学士学位,主要从事超导纳米线单光子探测器的应用研究。E-mail: zyxchen@mail.sim.ac.cn



何宇昊(1989—),男,江苏南京人,硕士研究生,2011年于南京大学获得学士学位,主要从事超导纳米线单光子探测器的应用研究。E-mail: yhhe@mail.sim.ac.cn



张玲(1988—),女,湖南人,硕士研究生,2011年于上海交通大学获得学士学位,主要从事超导纳米线单光子探测器的器件制备研究。E-mail: ling.zhang@mail.sim.ac.cn

#### 导师简介:



尤立星(1976—),男,江苏涟水人,研究员,博士生导师,1997、2001、2003年于南京大学分别获得学士、硕士和博士学位。先后在日本东北大学、瑞典Chalmers技术大学、荷兰Twente大学、美国国家标准与技术研究所(NIST@Boulder)开展超导电子学领域研究工作。主要从事超导电子学薄膜材料、微纳器件及应用等方面的研究。E-mail: lxyou@mail.sim.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)