

# 超导纳米线单光子探测的时间分辨率研究

张恒彬<sup>1</sup>, 谢军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>钱学森空间技术实验室, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国空间技术研究院, 北京 100094

**摘要** 超导纳米线单光子探测器(SNSPD)被认为是一种具有良好综合性能的单光子探测技术,其优异的时间分辨能力使得该器件在量子精密测量和时变天文观测等领域具有广泛的应用。从热周期、电周期和时间抖动三个方面,综述了 SNSPD 时间分辨率的影响因素、内在的物理机制、内禀极限以及可能的优化方向,并介绍了本课题组最近关于 X 射线 SNSPDs 的时间分辨率研究。SNSPDs 的研究有助于揭示超导纳米线单光子探测技术内在的物理机制,对其在时间测量相关的实际工程中的应用具有价值。

**关键词** 成像系统; 时间分辨率; 超导纳米线; 单光子探测; 时间抖动

中图分类号 O59

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011006

## Temporal Resolution of Superconducting Nanowire Single Photon Detection

Zhang Hengbin<sup>1</sup>, Xie Jun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup> China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

**Abstract** Superconducting nanowires single photon detection (SNSPD) is considered as a technology with excellent comprehensive performances. In particular, its excellent temporal resolution makes itself possess a wide application in the fields including quantum precision measurement and time-varying astronomical observation. In this paper, from three aspects of heat cycle, electrical cycle and time jitter, we reviewed the influence factors of temporal resolution and underlying physical mechanism, intrinsic limits, and possible optimization directions in SNSPD. In addition, we introduced the recent temporal resolution works related to X-ray SNSPDs in our group. The study in SNSPD is helpful to disclose the internal physical mechanism of the SNSPD technology and shows some value in the practical engineering application related to time measurement.

**Key words** imaging systems; temporal resolution; superconducting nanowires; single photon detection; time jitter

**OCIS codes** 110.2970;040.5570; 120.1880; 320.7100

## 1 引言

超导纳米线单光子探测器(SNSPDs)是将超导薄膜制备为超薄、亚微米宽的蜿蜒线结构,以实现入射光子信息的高精度探测。在近红外波段, SNSPDs 具有超低暗计数(10 Hz)、超高量子效率

(95%)、超高计数率( $10^9/s$ )和超低时间抖动(20 ps),已被广泛应用于量子通信、激光测距及单光子源表征等精密测量中。SNSPDs 的探测原理相对简单:纳米线被偏置于略低于其临界电流的位置,当单光子入射到纳米线上时,会形成一个局部的有阻热电子云(称为热点)并触发一个电压脉冲信号,

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-02-28; 录用日期: 2021-03-23

\* E-mail: xiejun001@163.com

其幅值和宽度表征了入射光子的信息。SNSPDs 内在的物理机制比较复杂,主要受电子扩散、电声相互作用和电子非弹性散射等具体微观过程的影响。随着 SNSPDs 的发展,研究者对其探测机理、器件结构、性能和应用进行了研究<sup>[1-5]</sup>。其中,在 SNSPDs 时间分辨率的理论和实验研究中,研究者为了实现更高的最大计数率和更低的时间抖动,基于新的读出电路结构和多像元阵列,试图将时间分辨率提高至接近其内禀极限,但这仍然具有挑战性。

时间分辨率的概念在不同的光电探测器中不尽相同,有的用探测器死时间表示<sup>[6]</sup>,有的用响应脉冲宽度表示,有的用光子到达时间的抖动表示<sup>[7]</sup>。在 SNSPDs 的大部分研究中,时间分辨率等同于时间抖动。本文将从时间分辨率出发,系统分析影响因素,并最终聚焦到三个时间量即热周期、电周期和时间抖动。此外,光子波长作为一个变量,也会细微影响可见光-近红外波段 SNSPDs 时间分辨率,特别是当其他影响因素被显著抑制时,光波长对时间分辨率的影响不可忽略。此外,本课题组创新性地开展了 X 射线 SNSPDs 的时间分辨率研究,将波长扩展到 X 射线波段,观察到了传统 SNSPDs 时间分辨率研究没有的实验现象,并进行了机理解释。SNSPDs 的研究不仅对 SNSPDs 时间分辨率指标的优化和应用具有价值,还有助于深刻揭示 SNSPDs 及其他超导光电探测器的探测机理。

## 2 时间分辨率

光电探测器的时间分辨率是连续到达的两个光子的最小时间间隔,在该时间间隔内能够区分这两个光子,其可以通过响应电压脉冲波包的可区分度进行辨识<sup>[8-9]</sup>。对于超导纳米线探测器,其时间分辨能力与热周期时间( $T_T$ )、电周期时间( $T_E$ )和时间抖动有关。热周期与纳米线中准粒子演变的微观物理过程相关,包括纳米线吸收光子、产生热点和热点扩散等热过程。热周期的时间可通过双光子泵浦效率曲线测量<sup>[10-11]</sup>或磁阻测量<sup>[12]</sup>间接得到。电周期是指将纳米线作为宏观电路的一部分,其响应光子入射并输出电脉冲的整个过程。由于超薄超窄的纳米线结构以及电热负反馈的作用,热周期的时间尺度仅为几十 ps 量级<sup>[13]</sup>。相比较而言,纳米线具有较大的动态电感,其电周期的时间要长很多,大约在 10 ns 量级<sup>[14-15]</sup>。

### 2.1 热周期

SNSPDs 的热周期与光子的吸收、热点的形成

及演化等整个微观过程密切相关。光子被吸收后,激发的电子由于受热形成了初始的热点。通过主要的电子非弹性散射和次要的电声相互作用,大量的库珀对被拆散成为热电子云,进而迅速冷却成为最初的热点。由于电声弛豫和电子扩散,伴随着数量相当的电子和声子,形成了初始电阻热点。随着热点的进一步增大,热点温度开始下降,一些库珀对被重新组合。经过足够长的时间(大约为 1 ns 量级),随着能量从声子处逃逸到衬底,热点缩小并最终消失,等待下一个光子的到达。

从准粒子相互作用的角度来看,上述热点演化的过程按从小到大的时间尺度可以分解为电子非弹性散射时间( $\tau_{ee}$ )、电子扩散时间( $\tau_d$ )、电-声作用时间( $\tau_{ep}$ )、声-电作用时间( $\tau_{pe}$ )和声子逃逸至衬底的时间( $\tau_{es}$ )等子过程<sup>[4]</sup>。相比于传统的超导辐射热计(bolometer),SNSPDs 属于热电子型器件,其中的准粒子处于非平衡态,因此需要将电子和声子作为两个独立的子系统进行研究。利用两个热扩散方程分别描述二者的温度随时间的演变规律<sup>[16]</sup>:

$$c_e \frac{dT_e}{dt} = -\frac{c_e}{\tau_{ep}}(T_e - T_p) + P(t), \quad (1)$$

$$c_p \frac{dT_p}{dt} = -\frac{c_e}{\tau_{ep}}(T_e - T_p) - \frac{c_p}{\tau_{es}}(T_p - T_0), \quad (2)$$

式中: $c_e$ 和 $c_p$ 分别代表电子和声子的比热容; $T_e$ 、 $T_p$ 和 $T_0$ 分别代表电子、声子和衬底的温度; $P(t)$ 代表纳米线单位体积吸收的热功率; $t$ 代表对应的时刻。

2-T 模型非常适用于基于泵浦探测的热点弛豫时间研究<sup>[10, 17]</sup>,利用该模型可以简便地得到二维结果<sup>[18]</sup>。另一种思路是考虑纳米线内的微观粒子分布随时间的演化<sup>[19]</sup>,其中电子和准粒子的分布<sup>[20]</sup>可以描述为

$$\frac{\partial C_e(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D_e \nabla^2 C_e(\mathbf{r}, t), \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{qp}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D_{qp} \nabla^2 C_{qp}(\mathbf{r}, t) - \frac{C_{qp}(\mathbf{r}, t)}{\tau_r} + \frac{\zeta h \nu}{\Delta \tau_{qp}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{qp}}\right) C_e(\mathbf{r}, t), \quad (4)$$

式中: $C_e(\mathbf{r}, t)$ 和 $C_{qp}(\mathbf{r}, t)$ 分别代表电子和准粒子的概率密度; $\mathbf{r}$ 代表具体的位置; $D_e$ 和 $D_{qp}$ 分别代表电子和声子的扩散系数; $\tau_{qp}$ 代表热弛豫时间; $\tau_r$ 代表准粒子寿命; $\zeta$ 代表光子能量的转换效率; $h$ 代表普朗克常数; $\nu$ 代表电磁辐射频率。

采用准粒子扩散模型,Engle 等<sup>[21]</sup>系统研究了

准粒子数目、电流密度、涡旋边界势垒等随时间的演化情况。通过进一步考虑电流密度在纳米线失超瞬间的重新分布以及入射在纳米线中心以外区域的光子,研究者对 SNSPDs 的时间相关物理量开展了深入的研究<sup>[22-23]</sup>。为了求解光子入射后电阻态形成的时间延迟( $T_d$ ),研究者采用含时的吉布斯-朗道方程(TDGL)求解超导序参量<sup>[24]</sup>,同时通过结合热扩散方程和泊松方程,将准粒子的温度分布和纳米线的电势分布描述为

$$\frac{\pi\hbar}{8k_B T_c} \left( \frac{\partial}{\partial t} - \frac{i2e\varphi}{\hbar} \right) \Delta = \xi_{GL}(0)^2 \left( \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta}{\partial y^2} \right) + \left( 1 - \frac{T}{T_c} - \frac{|\Delta|^2}{\Delta_{GL}(0)^2} \right) \Delta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\rho_n j_n^2}{C_v} - \frac{T - T_0}{\tau_{ep}}, \quad (6)$$

$$\Delta\varphi = \rho_n \text{div}(\mathbf{j}_s), \quad (7)$$

式中: $\hbar$  代表约化普朗克常数; $k_B$  代表玻尔兹曼常数; $T_c$  代表临界温度; $e$  代表电子电量; $\varphi$  代表电势; $\Delta$  代表序参量; $\xi_{GL}$  和  $\Delta_{GL}$  分别代表相干长度和吉布斯-朗道序参量; $x$ 、 $y$  分别代表横、纵坐标; $T$  代表温度; $D$  代表扩散常数; $\rho_n$  代表电阻率; $j_n$  和  $j_s$  代表电流密度,且满足  $\nabla \cdot (\mathbf{j}_s + \mathbf{j}_n) = 0$ ;  $C_v$  代表准粒子热容。

Vodolazov<sup>[25]</sup>将 2-T 模型与上述 TDGL 方法结合,采用超导序参量替代上述准粒子分布,系统计算了 SNSPDs 中影响  $T_d$  的因素,分析了包括时间抖动在内的优化 SNSPDs 性能需要考虑的因素,并通过定义电-声耦合系数( $\gamma$ ),对电子的热化时间和热点的弛豫时间进行了半定量的估计<sup>[26]</sup>。其中,电子的热化时间对应于热过程的上升沿时间( $t_s$ ),而热点的弛豫时间对应于热过程的下降沿时间( $t_{rl}$ )。随着  $\gamma$  的减小,电子的热化时间会变短,从而电子和声子的子系统很快实现了热平衡。然而,光子能量从电子子系统逃逸到声子子系统,导致形成的热点尺寸减小,同时器件的能量分辨率和灵敏度下降。热点的弛豫时间为  $\tau_{HS} = \tau_{ep} + (1 + C_e/C_{ph})\tau_{es}$ ,其中  $C_e$  为电子的热容,  $C_{ph}$  为声子的热容。对于 Nb 等  $\tau_{es} \gg \tau_{ep}$  的材料,其热点的弛豫时间主要由  $\tau_{ep}$  决定。

理论和实验研究表明,热周期的时间与超导材料密切相关。对于 NbN 纳米线,其  $\gamma = 9$ ,且  $\tau_{ep}$  在数十 ps 量级,因此其热周期时间非常短,大约为几十 ps。这也与泵浦光谱测量和 Rothwarf-Taylor 理

论拟合所得到的 30 ps 相当<sup>[13]</sup>。对于 WSi 纳米线,其  $\gamma = 89$ ,且  $\tau_{ep}$  在数百 ps 量级,也与双光子泵浦探测实验和动力学理论模型分析的结果吻合<sup>[10]</sup>。另外,热周期的物理过程和时间尺度与纳米线的线宽、衬底材料、超导薄膜质量、偏置电流、温度和激发能等均有密切关系<sup>[10-12, 27-29]</sup>,但是调节这些参数一般也会影响其他探测性能,因此在缩短热周期时间的同时,需要综合考虑其他综合性能。需要指出的是,目前关于 SNSPDs 吸收光子而产生有阻区域并恢复超导状态的动态过程机制尚不明确,双光子泵浦实验结果和相应的理论模型<sup>[10, 27]</sup>表明,热点的弛豫过程可能受其他因素影响,对于 WSi 纳米线,准粒子的再重组主导了整个热点的弛豫过程。此外,关于其他超导探测器的准粒子演变过程的研究<sup>[30]</sup>,有助于深刻理解 SNSPDs 的热周期及其探测机制。

## 2.2 电周期

热周期决定了 SNSPDs 响应时间和时间抖动的上限,然而在实际测试中,由于纳米线动态电感和读出电路阻抗的影响,响应电脉冲的宽度远远大于其热周期时间。因此,在 SNSPDs 的电周期研究中,可以简化上述各种准粒子和微观物理量的求解。Yang 等<sup>[31]</sup>忽略有阻区域形成初期的热点演变过程及 sidewalk 效应,用热带(hot-belt)替代光子入射纳米线形成的热点(hot-spot)。该热过程可以用一维的热扩散方程简化为

$$J^2 \rho + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{d} (T - T_{sub}) = \frac{\partial(cT)}{\partial t}, \quad (8)$$

式中: $J$  为电流密度; $\rho$  为电阻率; $\kappa$  为纳米线的热导率; $\alpha$  为纳米线与衬底的热导率; $d$  为纳米线厚度; $T_{sub}$  为衬底温度; $c$  为单位体积的比热。

超导状态的纳米线吸收光子后,局部区域会形成“热点”。在偏置电流的焦耳热、沿纳米线扩散的热和在基底上扩散的热的作用下,如图 1(a)所示,热点会经历形成-扩大-缩小-消失的演变过程。将纳米线等效为电阻和电感,如图 1(b)所示,其等效电路方程为

$$C_{bt} \left[ \frac{d^2 L_k I}{dt^2} + \frac{d(IR_n)}{dt} + Z_0 \frac{dI}{dt} \right] = I_b - I, \quad (9)$$

式中: $C_{bt}$  为电容; $L_k$  为纳米线的动态电感; $I$  为流经纳米线的电流; $R_n$  为纳米线的失超电阻; $Z_0$  为阻抗; $I_b$  为偏置电流。

联立上述热、电方程(8)、(9)式,可以仿真光子响应到输出电脉冲的过程。图 2 为采用一维电热模

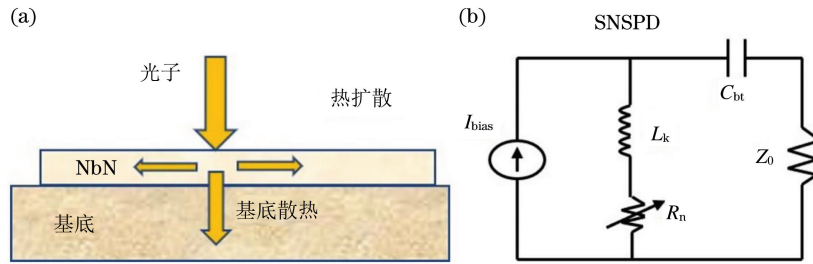


图 1 纳米线的电热模型<sup>[31]</sup>。(a)纳米线的热扩散示意图;(b)纳米线吸收光子时的等效电路图  
Fig. 1 Electro-thermal model of nanowire<sup>[31]</sup>. (a) Schematic of thermal diffusion of nanowires; (b) equivalent circuit diagram when nanowires absorb photons

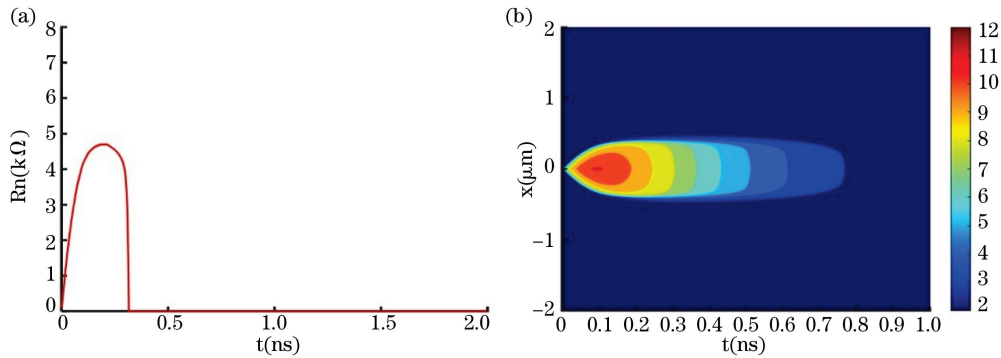


图 2 一维电热模型的仿真结果<sup>[32]</sup>。(a)热点电阻随时间的变化;(b)纳米线温度随时间的变化  
Fig. 2 Simulation results of 1D electro-thermal model<sup>[32]</sup>. (a) Hot spot resistance versus time; (b) nanowire temperature versus time

型仿真得到的热点电阻和纳米线温度随时间的变化情况。输出脉冲波形主要由时间延迟、上升沿和下降沿组成。上升沿时间( $t_{ri}$ )对应于纳米线从超导态到正常态的转变时间,其表达式为  $t_{ri} = L_k / (50 + R_n)$ <sup>[14]</sup>。下降沿时间( $t_{rf}$ )对应于相反过程的转变时间,通常也称为复位时间,其表达式为  $t_{rf} = L_k / 50$ 。因此,在传统的读出电路结构中,下降沿时间主要由纳米线的动态电感决定。动态电感的表达式为

$$L_k(T) = \mu_0 \lambda^2(T) \left( \frac{l}{wd} \right), \quad (10)$$

式中: $\mu_0$  为磁导率常数; $\lambda$  为吉布斯-朗道磁场穿透深度; $l$ 、 $w$  和  $d$  分别为纳米线的总长度、宽度和厚度。根据(1)式,可以通过减小纳米线的长度、加厚薄膜或加宽线宽<sup>[33]</sup>来缩短 SNSPDs 的复位时间。增加纳米线截面积会导致探测灵敏度的下降,因此实验中一般通过减小纳米线的长度来缩短器件的复位时间<sup>[14]</sup>,由此会带来探测效率下降的问题,总体思路是通过聚焦将光斑耦合到更小的有效探测区域,比如采用光纤耦合或垂直波导结构<sup>[34-36]</sup>,从而兼顾探测速度和探测效率。

相比影响下降沿时间的因素,影响上升沿时间的因素较复杂。由于纳米线的失超电阻  $R_n$  与纳米线的长度有关,上升沿时间与纳米线长度并非呈线性变化关系<sup>[37]</sup>,通过缩短纳米线总长度来缩短上升沿时间,效果并不十分明显。而  $t_{ri}$  的表达式表明,可以通过增加串联附加电阻  $R_s$  来显著缩短上升沿时间。本课题组通过 Python 建立了电热模型,仿真分析了动态电感和  $R_s$  对器件响应脉冲的影响<sup>[32]</sup>,如图 3 所示,随着动态电感的减小和  $R_s$  的增加,上升沿时间和下降沿时间均会缩短,然而对于 2000  $\Omega$  的附加电阻,焦耳加热则会维持一个自热有阻区域,导致器件处于“闩锁”的稳定状态而无法恢复。为了避免器件的闩锁效应,热点弛豫的能量要大于热点阻区产生的焦耳热量。定义一个阻尼系数  $\xi = \frac{I_0}{4I_{ss}} \sqrt{\tau_{th} / \tau_e}$ ,其中  $I_0$  为偏置电流,  $I_{ss}$  为焦耳热等效的热点电流,  $\tau_{th}$  和  $\tau_e$  分别为热时间常数和电时间常数,二者的比显著影响闩锁效应。 $\xi$  越小,器件越不容易发生闩锁效应。在实际器件工作中,减小  $I_0$  会降低器件的探测效率,因此可以通过增加器件与衬底的热传导、增大电时间常数或减小热时间

常数<sup>[38]</sup>来避免闩锁效应,但需要注意防止响应时间过短导致被激发的热点过快消失而错过了光子的响应。目前,比较有效的方法有双稳态超导纳米线系

统的门压模式<sup>[39-40]</sup>、主动的淬熄电路<sup>[41]</sup>和准恒压的偏置方法<sup>[42]</sup>,它们均可以提高测量信噪比和降低时间抖动,同时器件不发生闩锁效应。

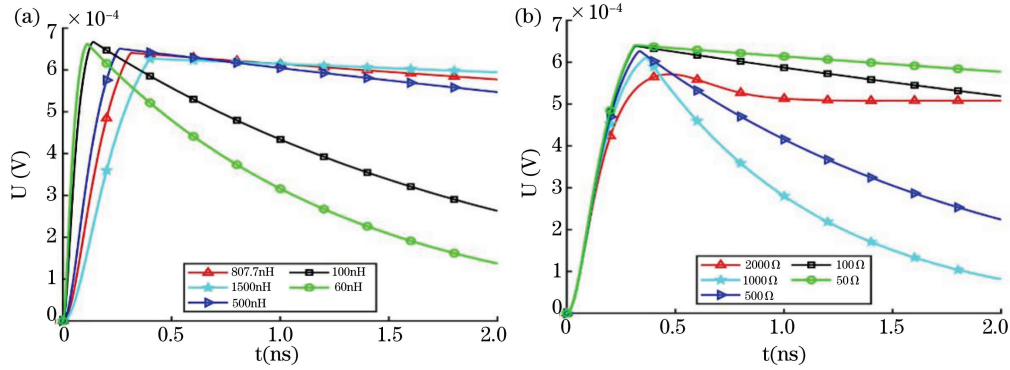


图 3 电路元件参数的仿真结果<sup>[32]</sup>。(a)动态电感对输出电压脉冲的影响;(b)附加电阻对输出电压脉冲的影响

Fig. 3 Simulation results of circuit element parameters<sup>[32]</sup>. (a) Influence of dynamic inductance on output voltage pulse; (b) influence of additional resistance on output voltage pulse

### 2.3 时间抖动

从电周期和热周期的角度来看,为了优化时间分辨率,要求探测器响应更“快”,而时间抖动则要求探测器响应更“稳”。时间抖动是时间分辨率的一个关键决定因素,主要表征单个光子的到达时间与理想周期性响应电压脉冲到达时间的偏差,它从根本上限制了时间相关测量中光子到达时间的计时精度。特别是标记时间戳的光子序列,其到达时间的抖动会对时间序列相关实验的准确性造成根本性的影响。在外部的实验参数中,偏置电流和温度对时间抖动值具有显著影响,如图 4 所示。You 等<sup>[43]</sup>在时间相关单光子计数(TCSPC)测试系统中,将 SNSPDs 的系统时间抖动分解为  $j_{system} =$

$\sqrt{j_{intr}^2 + j_{SNR}^2 + j_{laser}^2 + j_{SYNC}^2 + j_{SPC}^2}$ , 其中  $j_{intr}$ ,  $j_{SNR}$ ,  $j_{laser}$ ,  $j_{SYNC}$  和  $j_{SPC}$  分别代表本征抖动时间、低信噪比引起的抖动时间、激光的抖动时间、同步信号的抖动时间以及 TCSPC 模块的抖动时间。对于工作在 1550 nm 的 NbN SNSPDs,后四个因素的典型值分别为 5, 0.1, 4.0, 7.6 ps。  $j_{SNR}$ 、 $j_{SYNC}$ 、 $j_{SPC}$  主要由读出电路决定,可以通过采用低噪声低温放大器和改变偏置方式来抑制它们。然而,  $j_{intr}$  是由 SNSPDs 的本征探测机制决定的,其来源尚不明确。仿真结果表明,其最终极限低于 1 ps<sup>[22]</sup>,而目前实验测得的最低值为 2.6 ps<sup>[44]</sup>。因此,为了进一步降低时间抖动,需要对本征时间抖动的影响因素和优化途径进行系统的研究,下面我们对其进行分类总结和讨论。

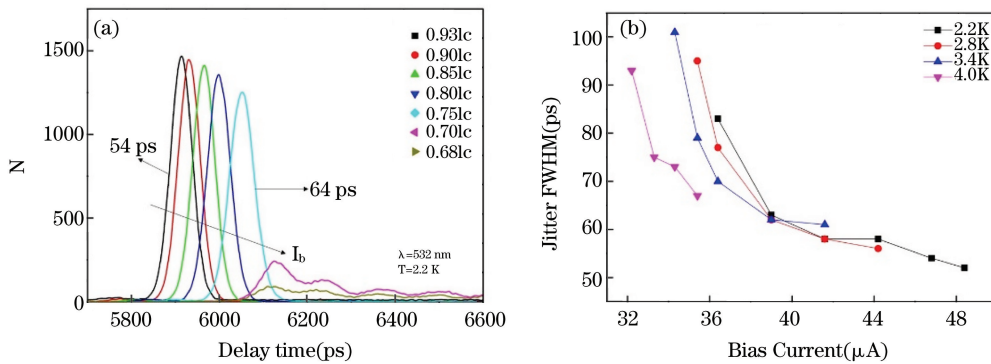


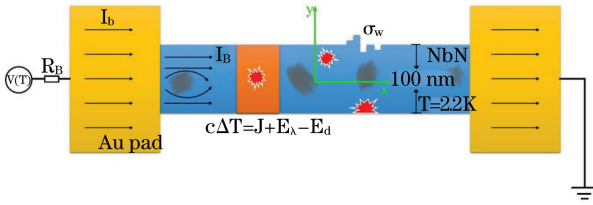
图 4 外部参数对时间抖动的影响<sup>[45]</sup>。(a)偏置电流;(b)基底温度

Fig. 4 Influence of external parameters on time jitter<sup>[45]</sup>. (a) Bias current; (b) substrate temperature

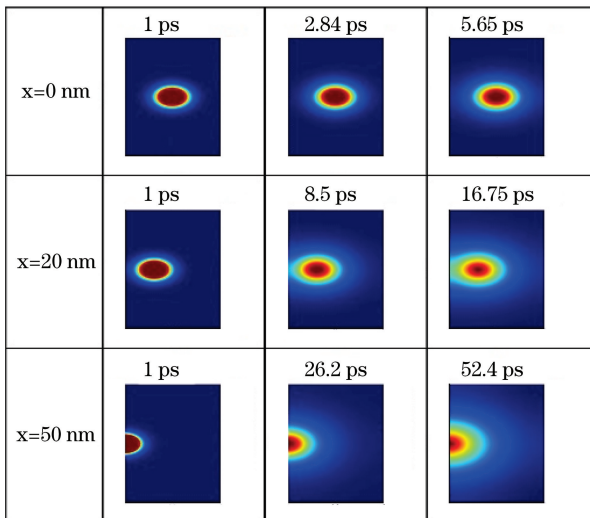
#### 2.3.1 横截面效应

本征时间抖动的第一个来源是空间位置相关的时间抖动,如图 5 中的放射状记号所示,它是由光子

到达纳米线横截面上的位置的不确定性引起的。在探测过程中,相比入射到纳米线中心,光子入射到纳米线边缘时形成的热点小,产生了更高的电子云温

图 5 超导纳米线单光子探测原理示意图<sup>[46]</sup>Fig. 5 Principle diagram of SNSPD<sup>[46]</sup>

度,导致出现一个上升时间更短的响应电压脉冲<sup>[47]</sup>。从微观物理机制上来看,当光子入射到纳米线横截面的不同位置时,磁通隧穿导致的时间延迟会不同<sup>[22]</sup>。因此,横截面位置不确定性引起的时间抖动与偏置电流、纳米线宽度和光子极化方向有关。最近,本课题组构建了二维的电热模型,将热点形成和演化的早期过程加入到模型中,从而可以得到横截面效应对光子响应以及时间抖动的影响<sup>[48]</sup>,如图 6 所示,而这在传统的一维热带模型中往往被忽略<sup>[31]</sup>。横向位置的不确定性引起的时间抖动较小(小于 10 ps),可以通过减小纳米线的宽度来抑制<sup>[49]</sup>,但由于固有的特性,其难以完全消除。

图 6 基于二维电热模型的横截面效应的仿真结果<sup>[46]</sup>Fig. 6 Simulation results of cross-sectional effect based on 2D electro-thermal model<sup>[46]</sup>

### 2.3.2 延迟线效应

另一种空间位置相关的时间抖动是沿着纳米线方向(纵向)的。研究者证实了光子响应的纵向空间依赖性。如果将超导纳米线视为传输线,光子入射到纳米线不同纵向位置引起的几何抖动不可忽视。研究表明,当 SNSPDs 器件的尺寸从  $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$  增加到  $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$  时,传输线引起的延迟时间的变化从几 ps 增加到大约 50 ps,对应于 20 ps 左右

的时间抖动,可以通过差分读出电路对其进行抑制<sup>[50]</sup>。此外,曲折纳米线上拐角部分和直线部分的响应过程不尽相同,当光子作用在远离拐点的纳米线中心位置时,探测具有最高灵敏度<sup>[51]</sup>,因此拐角部分和直角部分对时间抖动的影响也存在差异。随着光子能量和偏置电流的降低,探测图像从确定性转变到概率性,其本征抖动主要由曲折线的直线部分和拐角附近的区域决定<sup>[52-53]</sup>。与横截面效应相关的时间抖动相比,纵向位置相关的时间抖动受纳米线总长度的影响更大,影响且为正,可以通过阵列器件结构<sup>[54-56]</sup>和新的读出电路<sup>[57-58]</sup>来显著抑制。

### 2.3.3 空间分布不均匀性

空间分布的不均匀性,如缺陷或压缩,如图 5 中的模糊状记号所示,是本征时间抖动的另一个产生来源。实验结果表明,NbN 薄膜在 100 nm 尺度下具有明显的非均匀性<sup>[59]</sup>,这对 SNSPDs 的性能有很大的影响,如探测效率波动较大<sup>[60-61]</sup>,且电子态的不均匀或无序波动会导致临界温度沿纳米线发生随机变化<sup>[62]</sup>,这些均会导致纳米线光电响应的不确定性。O'Connor 等<sup>[63]</sup>证明,器件制备过程中产生的压缩态可使器件高、低灵敏度部分产生高达 20 ps 的时间抖动。Cheng 等<sup>[64]</sup>采用电热模型和蒙特卡罗方法,模拟了随机电子态涨落和几何涨落对时间抖动的影响,对于总的 15 ps 时间抖动,发现分布式不均匀性贡献了绝大部分。相关仿真结果表明,几何尺寸分布的不均匀性( $\sigma_w$ )、热电分布的不均匀性、杂质缺陷等空间分布的不均匀性引入的时间抖动会随着偏置电流的减小而增大,但与入射光子的波长关系不大,如图 7 所示。非均匀性和局部的收缩使热点产生不同的局域性,从而限制了最大偏置电流,延长了热弛豫时间,进而增大了非均匀性引起的时间抖动。一些实验表明,宽纳米线的本征时间抖动主要由空间分布的不均匀性决定,而 Fano 波动对窄纳米线时间抖动的影响更为显著<sup>[65]</sup>。可以通过在纳米线中引入人工压缩<sup>[66]</sup>,研究空间不均匀性引起的时间抖动的影响因素,并进一步揭示其背后的物理机制。

### 2.3.4 Fano 波动

由能量耗散不同分支引起的 Fano 波动导致不同子系统(电子和声子)之间能量分配的变化,决定了超导探测器(如超导隧道结和超导动态电感)光谱分辨率和信噪比的理论极限。MoSi SNSPDs 在 750~2050 nm 波长范围内的光子能量-偏置电流的非线性关系被认为是 Fano 波动存在的证据<sup>[67]</sup>。对

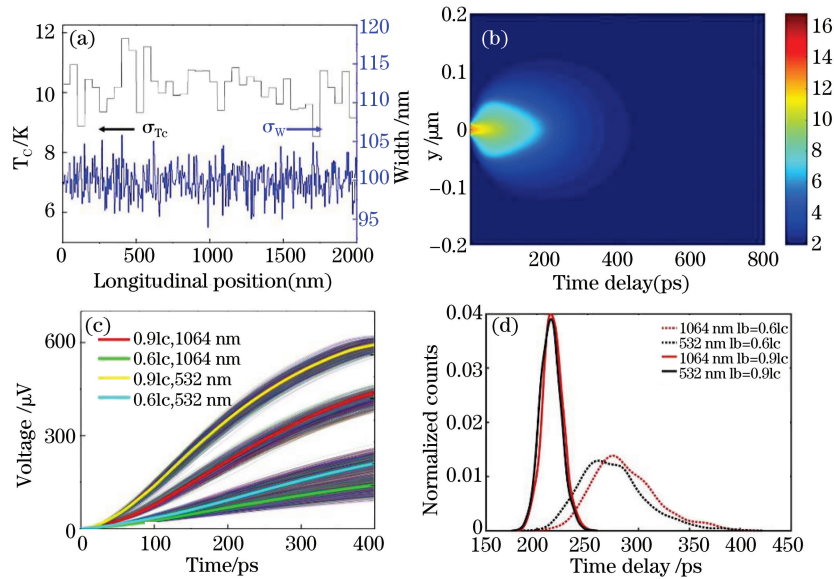


图 7 基于电热模型和蒙特卡罗方法的仿真结果<sup>[48]</sup>。(a)采用蒙特卡罗方法仿真得到的纳米线临界温度与线宽的随机波动；(b)采用一维电热模型仿真得到的纳米线中的热点随时间的变化；(c)采用蒙特卡罗方法随机仿真得到的 1064 nm 和 532 nm 波长光子的输出电压波形；(d)对应于图 8(c)中四种条件下的光子到达时间的统计分布图

Fig. 7 Simulation results based on electro-thermal model and Monte Carlo method<sup>[48]</sup>. (a) Random fluctuation in critical temperature and linewidth of nanowires simulated by Monte Carlo method; (b) change of hot spots in nanowires with time obtained by 1D electro-thermal model; (c) output voltage waveforms of 1064 nm and 532 nm photons obtained by Monte Carlo random simulation; (d) statistical distributions of photon arrival time under four conditions in Fig. 7(c)

于厚膜器件,其薄膜厚度与声子的平均自由程相当,因此可以通过降低高频声子在衬底的弛豫时间来降低 Fano 波动的影响<sup>[68]</sup>。Fano 波动主要存在于热点形成的初始阶段,由于电子的热化时间很短(ps 量级),相关理论计算表明,Fano 波动导致的 SNSPDs 时间抖动的极限在 1 ps 以下<sup>[68]</sup>。最近,本课题组开展了 X 射线波段 SNSPDs 时间抖动的相关工作,相信可以更加深刻地研究不同能量耗散引起的 Fano 波动对 SNSPDs 时间抖动的影响。

### 3 波长相关的时间抖动

#### 3.1 可见光-近红外波段

SNSPDs 的时间抖动与入射光子波长的关系一直未被深入研究,甚至被认为二者关系不大<sup>[69]</sup>。近年来,测量仪器和读出电路等引入的系统抖动和其他本征时间抖动得到显著抑制,波长相关的时间抖动引起了学者们的广泛关注。2017 年, Sidorova 等<sup>[52]</sup>实验发现,对于 800 nm 和 1560 nm 的光子,其时间延迟的概率密度函数(PDF)分布的半峰全宽存在几个 ps 的差异,且 PDF 分布曲线的不对称性随偏置电流和器件面积的变化而发生细微的变化。将本征时间抖动  $\sigma$  分为  $\sigma_{\text{bend}}$  和  $\sigma_{\text{wire}}$ ,  $\sigma_{\text{bend}}$  和  $\sigma_{\text{wire}}$  分别

对应于纳米线中的拐角部分和直线部分,两种不同能量的光子可能服从不同的底层探测机制。能量较高的 800 nm 光子对应于确定性探测机制,其时间抖动主要由直线部分的与位置相关的探测阈值决定。而能量较低的 1600 nm 光子对应于概率性探测机制,拐角部分磁通随机隧穿的泊松过程是该时间抖动的主要来源。因此,研究者提出 PDF 的非高斯曲线的左半边可能是由热点的演变决定的,而右半边是由磁通涡旋引起的,但是均未能很好地解释 PDF 曲线右半边突起(shoulder)的来源和机制。

为了更加深入地研究和解释不同波长光子时间抖动的差异,学者们研究的重点开始聚焦于光子入射到有阻热点产生的初期阶段,并且从延迟时间( $t_1$ )的角度研究 SNSPDs 时间抖动的波长相关性。基于 TDGL 方程的唯象<sup>[68]</sup>和微观<sup>[25]</sup>求解,通过引入空间不均匀性和 Fano 波动,较好地解释实验中观察到的时间抖动随入射光子能量的增加和偏置电流的加大而逐渐减小的现象,并证明了理论上最小的时间抖动在偏置电流接近临界电流时,可以达到超导序参量的最小弛豫时间  $\hbar/(k_B T_c)$ 。也有研究将超导序参量的最小弛豫时间称为量子时间抖动

(quantum jitter)。学者们认为,通过准确获得光子入射的位置,可完全克服器件结构和位置相关的时间抖动。然而,根据量子力学的马尔可夫理论,对于单光子探测, SNSPDs 输出响应电脉冲的上升沿和下降沿与传统光电探测器中不同,是概率性的<sup>[70]</sup>, 可以通过降低温度、增大偏置电流、增大光子能量或减小线宽来尽量减小这种量子时间抖动<sup>[23]</sup>,但是难以完全克服。

在波长相关的时间抖动方面,本课题组也开展了相关的研究工作<sup>[45]</sup>。如图 8(a)所示,采用普通的曲折线结构(探测效率 > 85%)和室温放大器,通过

严格控制各部分的时间抖动,实现了不同波长入射光子 2~3 ps 时间抖动差异的分辨。基于此,本课题组还创新性地提出了一种基于 SNSPDs 超高时间分辨率的能谱分辨方法,如图 8(b)所示,其最优能谱分辨率为 80 nm@900 nm,为未来 SNSPDs 在光谱探测和光子数分辨方面的应用提供了新的思路 and 方向。此外,本课题组还利用建立的电热模型和蒙特卡罗方法,仿真分析了不同波长光子入射到纳米线上的延迟时间,如图 9 所示,其结果能够半定量地解释变波长时间抖动实验中 PDF 曲线的右半部分随波长的增加而逐渐右移的现象<sup>[48]</sup>。

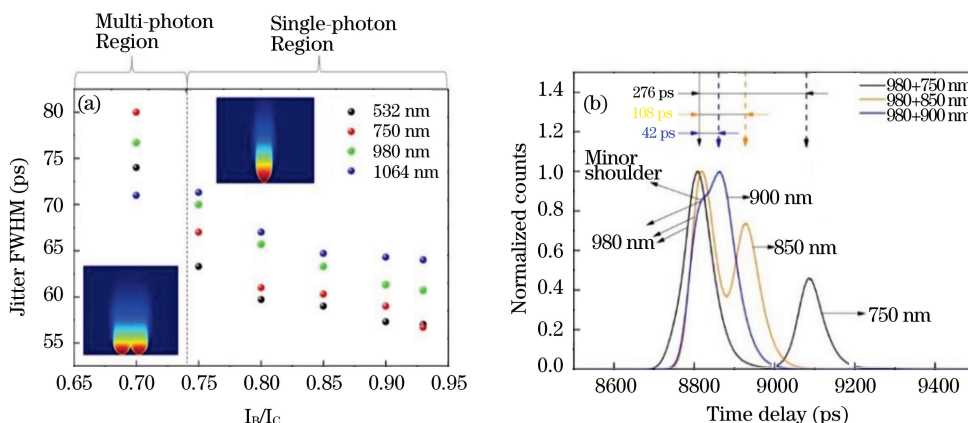


图 8 时间抖动与能谱分辨率的实验结果<sup>[45]</sup>。(a)不同偏置电流下 532,750,980,1064 nm 波长光子的时间抖动测试结果; (b)基于超快时间分辨率的 750,850,900,980 nm 波长光子的光谱分辨率测试结果  
Fig. 8 Experimental results of time jitter and spectral resolution<sup>[45]</sup>. (a) Time jitter test results of 532, 750, 980 and 1064 nm wavelength photons at different bias currents; (b) measured spectral resolution results of 750, 850, 900 and 980 nm wavelength photons based on ultrafast temporal resolution

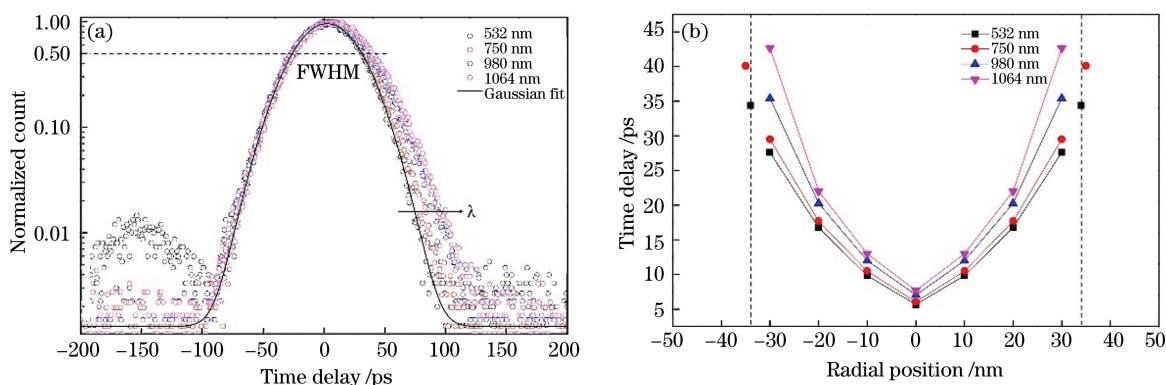


图 9 横截面效应的实验和仿真结果<sup>[46]</sup>。(a)四种不同波长光子 PDF 曲线的实验结果;(b)四种不同波长光子入射到纳米线横截面不同位置时的延迟时间的仿真结果

Fig. 9 Experimental and simulation results of cross sectional effect<sup>[46]</sup>. (a) Experimental PDF curves of four different wavelength photons; (b) simulated delay time when four different wavelength photons incident at different cross sectional positions of nanowires



### 3.2 软 X 射线波段

目前, SNSPDs 的超高时间分辨能力已经在量子信息科学、天文学、激光测距等领域得到了广泛的应用。然而, 适用的波长主要集中在可见和近红外波段。尽管飞行时间质谱 (TOF-MS) 中的 SNSPDs 已经应用于 keV 能量高分子的探测<sup>[71-73]</sup>, 但关于 X 射线波段光子探测的研究鲜有报道<sup>[74-77]</sup>。由于稳定超快 X 射线光源较难制备, X 射线波段 SNSPDs 的时间抖动难以准确测量。本课题组通过搭建一套大功率飞秒激光器打固体靶装置, 利用产生的飞秒 X 射线源, 获得 SNSPDs 在

X 射线波段的时间抖动均方根值为 248.2 ps<sup>[78]</sup>, 如图 10、11 所示。相比于可见-近红外光子, X 射线 SNSPDs 光子探测的机理已不完全是光电效应, 康普顿效应的影响不可忽视。X 射线波段的较厚纳米线有利于空间不均匀性方面的研究。此外, X 射线光子较大的能量也使得 Fano 波动对 SNSPDs 时间抖动的影响更加显著。将传统 SNSPDs 拓展到 X 射线波段, 对于更加全面地理解波长相关的时间抖动, 以及更加深刻地了解 SNSPDs 时间抖动的产生机制及其内部的准粒子演变过程均具有重要的意义。

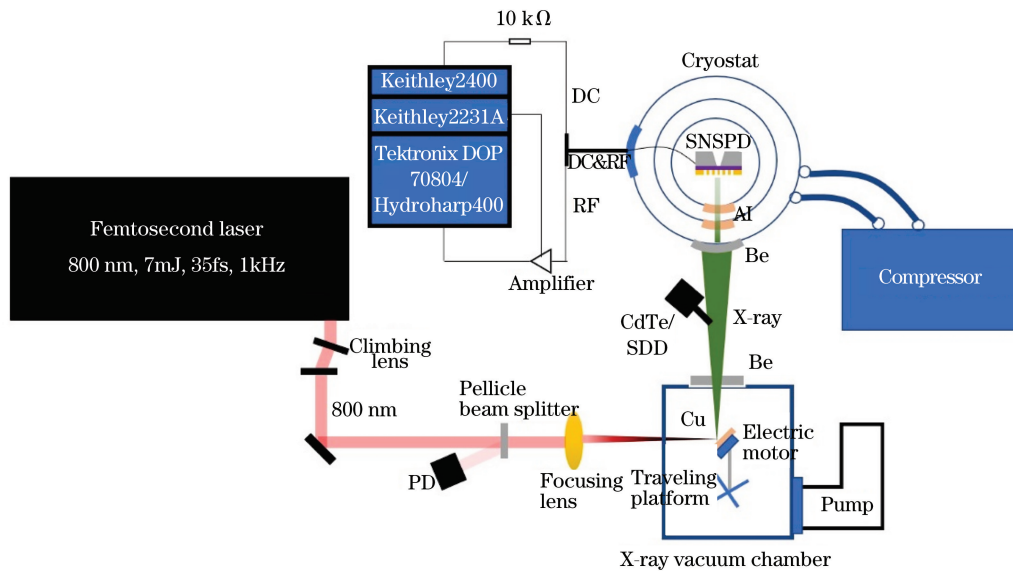


图 10 飞秒 X 射线 SNSPD 装置示意图<sup>[78]</sup>

Fig. 10 Experimental setup of femtosecond X-ray SNSPD<sup>[78]</sup>

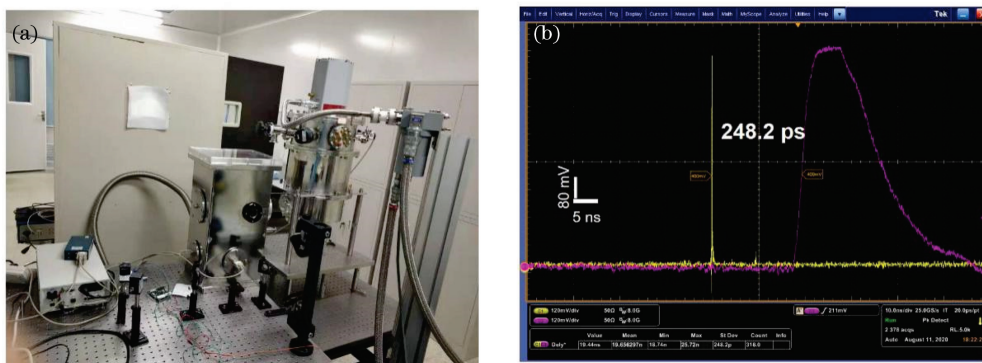


图 11 X 射线 SNSPD 实验<sup>[78]</sup>。(a) 飞秒 X 射线 SNSPD 装置实物图; (b) 示波器测试得到的 X-SNSPD 时间抖动

Fig. 11 Experiment of X-SNSPD<sup>[78]</sup>. (a) Practical image of femtosecond X-ray SNSPD setup;

(b) X-SNSPD time jitter measured by oscilloscope

相比于可见光-近红外波段, 为了保证 X 射线 SNSPDs 对 X 射线的吸收效率, 超导薄膜的厚度增加到了百纳米量级。同时, 将器件的有效探测面积

增大到  $100 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , 一方面能够增大 X 射线 SNSPDs 的探测效率, 另一方面也能避免厚膜器件发生闩锁效应, 保证连续探测。然而, 器件在超过

0.3 $I_c$  ( $I_c$  为临界电流) 的偏置电流时仍然会发生门控效应。虽然通过采用门控电源, 强制发生门控效应的器件恢复超导状态, 并将偏置电流增加到接近 0.9 $I_c$ , 实现了 100 ps 以内的时间抖动, 但是距离可见光-近红外的最低抖动时间 2.6 ps 仍有较大差距。因此, 本课题组正在通过优化芯片设计(缩小像元面积同时增加 X 射线毛细管聚集元件)、读出电路(采用差分读出电路消除较大探测面积引起的延迟线效应时间抖动)和飞秒 X 射线源(增加移动麦拉膜传动机构的专门腔室, 防止溅射物污染光学部件)等实验条件, 探索 X 射线 SNSPDs 较大时间抖动的根源, 进一步优化时间抖动指标, 以实现 X 射线 SNSPDs 在更高精度 X 射线时变天文观测<sup>[79]</sup>、脉冲 X 射线鬼成像等领域中的应用。

#### 4 总结与展望

超导纳米线作为一种较新的单光子探测技术, 在可见光-近红外波段具有高效率、可忽略暗计数、高速和低时间抖动的优势。但 SNSPDs 的时间分辨率机制尚未被完全理解, 这限制了其与时间相关的应用, 如量子通信和激光测距的精度改进。近年来, 随着测试方法和器件结构的优化, 关于 SNSPDs 时间分辨率的研究已经逐渐深入到其内部的机制, 这虽然极具挑战, 但十分重要。本课题组将 SNSPDs 时间分辨率的研究拓展到了 X 射线波段, 已经取得了一些不同于可见光-近红外波段的实验现象。相信 SNSPDs 时间分辨率的深入研究不仅有助于时间相关的实际工程应用<sup>[7, 80]</sup>, 而且对于揭示这类探测器和其他超导探测器的内在物理机制也具有重要意义。

#### 参 考 文 献

- [1] Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H. Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(6): 063001.
- [2] 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.
- [3] Engel A, Renema J J, Il'in K, et al. Detection mechanism of superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, 28(11): 114003.
- [4] Zhang H B, Xiao L, Luo B C, et al. The potential and challenges of time-resolved single-photon detection based on current-carrying superconducting nanowires [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(1): 013001.
- [5] Dauler E A, Grein M E, Kerman A J, et al. Review of superconducting nanowire single-photon detector system design options and demonstrated performance [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 081907.
- [6] He Y F, Zhao Y K, Li C Y, et al. Measurement-device-independent quantum key distribution of finite detector's dead time in heralded pair coherent state [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2427001.  
何业锋, 赵艳坤, 李春雨, 等. 标记配对相干态下有限探测器死时间的测量设备无关量子密钥分配[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2427001.
- [7] Liu H, Lu L, Zhu Y, et al. Influence of intensity scintillation on jitter in time transfer by space laser link[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0412007.  
刘航, 卢麟, 朱勇, 等. 光强闪烁对空间激光授时抖动的影响[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0412007.
- [8] Hofherr M, Arndt M, Il'in K, et al. Time-tagged multiplexing of serially biased superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 2501205.
- [9] Zhang J, Slysz W, Verevkin A, et al. Response time characterization of NbN superconducting single-photon detectors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13(2): 180-183.
- [10] Marsili F, Stevens M J, Kozorezov A, et al. Hotspot relaxation dynamics in a current-carrying superconductor [J]. *Physical Review B*, 2016, 93(9): 094518.
- [11] Ferrari S, Kovalyuk V, Hartmann W, et al. Hot-spot relaxation time current dependence in niobium nitride waveguide-integrated superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8739-8750.
- [12] Zhang X F, Lita A E, Sidorova M, et al. Superconducting fluctuations and characteristic time scales in amorphous WSi [J]. *Physical Review B*, 2018, 97(17): 174502.
- [13] Il'in K S, Lindgren M, Currie M, et al. Picosecond hot-electron energy relaxation in NbN superconducting photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(19): 2752.
- [14] Kerman A J, Dauler E A, Keicher W E, et al.

- Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(11): 111116.
- [15] He Y H, Lü C L, Zhang W J, et al. Statistical analysis of the temporal single-photon response of superconducting nanowire single photon detection[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(6): 060303.
- [16] Semenov A D, Nebosis R S, Gousev Y P, et al. Analysis of the nonequilibrium photoresponse of superconducting films to pulsed radiation by use of a two-temperature model [J]. *Physical Review B*, 1995, 52(1): 581-590.
- [17] Lindgren M, Currie M, Williams C, et al. Intrinsic picosecond response times of Y-Ba-Cu-O superconducting photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(6): 853-855.
- [18] McCaughan A N, Berggren K K. A superconducting-nanowire three-terminal electrothermal device [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(10): 5748-5753.
- [19] Semenov A D, Gol'tsman G N, Korneev A A. Quantum detection by current carrying superconducting film [J]. *Physica C: Superconductivity*, 2001, 351(4): 349-356.
- [20] Engel A, Schilling A. Numerical analysis of detection-mechanism models of superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(21): 214501.
- [21] Engel A, Lonsky J, Zhang X F, et al. Detection mechanism in SNSPD: numerical results of a conceptually simple, yet powerful detection model [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, 25(3): 1-7.
- [22] Wu H, Gu C, Cheng Y H, et al. Vortex-crossing-induced timing jitter of superconducting nanowire single-photon detectors [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: FF1E.5.
- [23] Jahani S, Yang L P, Tepole A B, et al. Probabilistic vortex crossing criterion for superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(14): 143101.
- [24] Zotova A N, Vodolazov D Y. Photon detection by current-carrying superconducting film: a time-dependent Ginzburg-Landau approach [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(2): 024509.
- [25] Vodolazov D Y. Minimal timing jitter in superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 014016.
- [26] Vodolazov D. Single-photon detection by a dirty current-carrying superconducting strip based on the kinetic-equation approach [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(3): 034014.
- [27] Kozorezov A G, Lambert C, Marsili F, et al. Quasiparticle recombination in hotspots in superconducting current-carrying nanowires [J]. *Physical Review B*, 2015, 92(6): 064504.
- [28] Zhang L, You L, Yang X, et al. Hotspot relaxation time of NbN superconducting nanowire single-photon detectors on various substrates [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1486.
- [29] Renema J J, Gaudio R, Wang Q, et al. Probing the hotspot interaction length in NbN nanowire superconducting single photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(23): 233103.
- [30] Kardakova A, Finkel M, Morozov D, et al. The electron-phonon relaxation time in thin superconducting titanium nitride films [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(25): 252602.
- [31] Yang J K W, Kerman A J, Dauler E A, et al. Modeling the electrical and thermal response of superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 581-585.
- [32] Long L X, Tian Y C, Guo J H, et al. Electrothermal simulation and timing jitter analysis of superconducting NbN nanowire [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2020, 48(9): 32-35, 41. 龙林鑫, 田侑成, 郭江华, 等. 超导 NbN 纳米线电热仿真及时间抖动分析 [J]. *低温与超导*, 2020, 48(9): 32-35, 41.
- [33] Suzuki K, Miki S, Shiki S, et al. Time resolution improvement of superconducting NbN stripline detectors for time-of-flight mass spectrometry [J]. *Applied Physics Express*, 2008, 1: 031702.
- [34] Sidorova M V, Divochiy A, Vakhtomin Y B, et al. Ultrafast superconducting single-photon detector with reduced-size active area coupled to a tapered lensed single-mode fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9504: 950408.
- [35] Vetter A, Ferrari S, Rath P, et al. Cavity-enhanced and ultrafast superconducting single-photon detectors [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7085-7092.
- [36] Liu J, Zhang L Q, Jiang Z N, et al. Superconducting nanowire single photon detector with optical cavity [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(8): 088502.
- [37] Smirnov K V, Divochiy A V, Vakhtomin Y B, et al.

- Rise time of voltage pulses in NbN superconducting single photon detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(5): 052601.
- [38] Annunziata A J, Quaranta O, Santavica D F, et al. Reset dynamics and latching in niobium superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 084507.
- [39] Akhlaghi M K, Majedi A H. Gated mode superconducting nanowire single photon detectors[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1608-1616.
- [40] Zhang L B, Zhang S, Tao X, et al. Quasi-gated superconducting nanowire single-photon detector[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27(2): 1-6.
- [41] Ravindran P, Cheng R S, Tang H, et al. Active quenching of superconducting nanowire single photon detectors [J]. *Optics Express*, 2020, 28 ( 3 ): 4099-4114.
- [42] Liu D K, Chen S J, You L X, et al. Nonlatching superconducting nanowire single-photon detection with quasi-constant-voltage bias[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(12): 125202.
- [43] You L X, Yang X Y, He Y H, et al. Jitter analysis of a superconducting nanowire single photon detector [J]. *AIP Advances*, 2013, 3(7): 072135.
- [44] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, et al. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(4): 250-255.
- [45] Zhang H B, Liu J K, Guo J H, et al. Photon energy-dependent timing jitter and spectrum resolution research based on time-resolved SNSPDs[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16696-16707.
- [46] Zhang H B, Tian Y C, Guo J H, et al. Origins of the wavelength dependent timing jitter in superconducting nanowire single photon detector[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11354: 113541S.
- [47] Pearlman A, Cross A, Slysz W, et al. Gigahertz counting rates of NbN single-photon detectors for quantum communications[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2): 579-582.
- [48] Guo J H, Tian Y C, Long L X, et al. Origin and mechanism of the wavelength-dependent timing jitter in superconducting nanowire [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2020, 14(4): 046012.
- [49] Najafi F, Marsili F, Dauler E, et al. Timing performance of 30-nm-wide superconducting nanowire avalanche photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(15): 152602.
- [50] Calandri N, Zhao Q Y, Zhu D, et al. Superconducting nanowire detector jitter limited by detector geometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(15): 152601.
- [51] Berdiyrov G R, Milošević M V, Peeters F M. Spatially dependent sensitivity of superconducting meanders as single-photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(26): 262603.
- [52] Sidorova M, Semenov A, Hübers H W, et al. Physical mechanisms of timing jitter in photon detection by current-carrying superconducting nanowires [J]. *Physical Review B*, 2017, 96 (18): 184504.
- [53] Sidorova M, Semenov A, Hübers H W, et al. Timing jitter in photon detection by straight superconducting nanowires: effect of magnetic field and photon flux [J]. *Physical Review B*, 2018, 98 (13): 134504.
- [54] Ejrnaes M, Casaburi A, Cristiano R, et al. Timing jitter of cascade switch superconducting nanowire single photon detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 132503.
- [55] Tarkhov M, Claudon J, Poizat J P, et al. Ultrafast reset time of superconducting single photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92 (24): 241112.
- [56] Zhao Q, McCaughan A N, Dane A E, et al. Eight-fold signal amplification of a superconducting nanowire single-photon detector using a multiple-avalanche architecture[J]. *Optics Express*, 2014, 22 (20): 24574-24581.
- [57] Miki S, Miyajima S, Yabuno M, et al. Superconducting coincidence photon detector with short timing jitter [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(26): 262601.
- [58] Kerman A J, Rosenberg D, Molnar R J, et al. Readout of superconducting nanowire single-photon detectors at high count rates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(14): 144511.
- [59] Gaudio R, Op't Hoog K P M, Zhou Z, et al. Inhomogeneous critical current in nanowire superconducting single-photon detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(22): 222602.
- [60] Kerman A J, Dauler E A, Yang J K W, et al. Constriction-limited detection efficiency of superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90

- (10): 101110.
- [61] Zotova A N. The contribution of bends and constrictions of a superconducting film to the photon detection by a single-photon superconducting detector [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2016, 122(5): 818-822.
- [62] Hortensius H L, Driessen E F C, Klapwijk T M. Possible indications of electronic inhomogeneities in superconducting nanowire detectors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 2200705.
- [63] O'Connor J A, Tanner M G, Natarajan C M, et al. Spatial dependence of output pulse delay in a niobium nitride nanowire superconducting single-photon detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(20): 201116.
- [64] Cheng Y H, Gu C, Hu X L. Inhomogeneity-induced timing jitter of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 062604.
- [65] Kozorezov A G, Lambert C, Marsili F, et al. Fano fluctuations in superconducting-nanowire single-photon detectors [J]. *Physical Review B*, 2017, 96(5): 054507.
- [66] Zhang L, You L X, Liu D K, et al. Characterization of superconducting nanowire single-photon detector with artificial constrictions[J]. *AIP Advances*, 2014, 4(6): 067114.
- [67] Caloz M, Korzh B, Timoney N, et al. Optically probing the detection mechanism in a molybdenum silicide superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(8): 083106.
- [68] Allmaras J P, Kozorezov A G, Korzh B A, et al. Intrinsic timing jitter and latency in superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(3): 034062.
- [69] Stevens M J, Hadfield R H, Gerrits T, et al. Infrared wavelength-dependent optical characterization of NbN nanowire superconducting single-photon detectors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(2/3): 358-363.
- [70] Yang L P, Tang H X, Jacob Z. Concept of quantum timing jitter and non-Markovian limits in single-photon detection[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(1): 013833.
- [71] Casaburi A, Ejrnaes M, Cristiano R. 1 mm ultrafast superconducting stripline molecule detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(17): 172508.
- [72] Casaburi A, Ejrnaes M, Zen N, et al. Thicker, more efficient superconducting strip-line detectors for high throughput macromolecules analysis [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(2): 023702.
- [73] Suzuki K, Shiki S, Ukibe M, et al. Hot-spot detection model in superconducting nano-stripline detector for keV ions [J]. *Applied Physics Express*, 2011, 4(8): 083101.
- [74] de Lara D P, Ejrnaes M, Casaburi A, et al. Feasibility investigation of NbN nanowires as detector in time-of-flight mass spectrometers for macromolecules of interest in biology (proteins) [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2008, 151(3/4): 771-776.
- [75] Inderbitzin K, Engel A, Schilling A, et al. An ultrafast superconducting Nb nanowire single-photon detector for soft X-rays [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 162601.
- [76] Inderbitzin K, Engel A, Schilling A. Soft X-ray single-photon detection with superconducting tantalum nitride and niobium nanowires [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, 23(3): 2200505.
- [77] Zhang X F, Wang Q, Schilling A. Superconducting single X-ray photon detector based on  $W_{0.8}Si_{0.2}$  [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(11): 115104.
- [78] Zhang H B, Guo S Y, Wang J G, et al. Temporal resolution research based on X-ray superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11554: 115540M.
- [79] Gao Y D, Wang H L, You S H, et al. X-ray pulsar signal denoising based on two-parameter threshold function and multi-layer threshold [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1204001.  
高迎东, 王宏力, 由四海, 等. 基于双参数阈值函数和多层阈值的 X 射线脉冲星信号消噪 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1204001.
- [80] Xue L, Zhai D S, Li Y Q, et al. Ranging capability analysis for laser ranging system using superconducting nanowire detectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0304001.  
薛莉, 翟东升, 李语强, 等. 基于超导探测器的激光测距系统作用距离分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0304001.