

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519352

## 超导并联纳米线双分辨单光子探测器\*

吴 焯<sup>1</sup> 陶 旭<sup>1,2</sup> 胡长雨<sup>1,2</sup>

(1.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2.无锡学院江苏省集成电路可靠性技术及检测系统工程研究中心 无锡 214105)

**摘要:** 本文提出一种超导并联纳米线双分辨单光子探测器,能够在单路读出条件下同步实现光子数分辨与空间位置分辨。该探测器由  $N$  个超导纳米线单元并联组成,每个单元通过并联不同阻值的标记电阻构建非对称电阻网络,再串联相同阻值电阻,由同一偏置电路提供偏置电流并输出信号。以 4 像元结构为例,设置梯度分布的并联电阻 (100、200、400、800  $\Omega$ ) 和 50  $\Omega$  串联电阻,通过 LTspice 仿真验证了基于响应脉冲幅度叠加可实现光子数与空间位置信息的同步分辨,最多可区分 4 光子事件及 15 种空间响应分布。进一步分析表明,该结构可有效抑制传统并联纳米线探测器中的电流分流与门锁效应,提升稳定性,但会一定程度降低输出信号幅值与信噪比。本研究为发展具有双分辨能力的超导并联纳米线单光子探测器(PND)提供了一种新颖且可行的技术路径,为未来开发大规模、高计数率、具备全信息获取能力的低 SWaP-C 多功能 PND 提供了一种新思路,拓宽了未来量子成像、激光雷达及量子通信等领域的应用。

**关键词:** 超导并联纳米线单光子探测器;光子数分辨;空间位置分辨;LTspice 仿真

**中图分类号:** TN202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Superconducting dual-resolution single-photon detectors with parallel nanowires

Wu Ye<sup>1</sup> Tao Xu<sup>1,2</sup> Hu Changyu<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Integrated Circuit Reliability Technology and Testing System Engineering Research Center, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

**Abstract:** This paper proposes a superconducting parallel-nanowire dual-resolution single-photon detector capable of simultaneously achieving photon-number resolution and spatial-position resolution under a single-output readout scheme. The detector consists of  $N$  superconducting nanowire units connected in parallel. Each unit incorporates a uniquely valued marking resistor in parallel to form an asymmetric resistor network, along with a series resistor of identical value. The entire array is biased by a common current source and read out through a single output channel. Taking a four-pixel structure as an example, with gradient-distributed shunt resistors (100, 200, 400, and 800  $\Omega$ ) and a 50  $\Omega$  series resistor, LTspice simulations demonstrate that the superposition of response pulse amplitudes enables simultaneous discrimination of both photon number and spatial location, allowing up to 4-photon events and 15 distinct spatial response patterns to be identified. Further analysis indicates that the proposed structure effectively suppresses current shunting and latching effects commonly found in conventional parallel-nanowire detectors, thereby enhancing operational stability, albeit at the cost of reduced output signal amplitude and signal-to-noise ratio. This study provides a novel and feasible technical pathway for developing dual-resolution PNDs, offering a new perspective for future large-scale, high-count-rate, and low-SWaP-C multifunctional PNDs with full-information acquisition capabilities, thereby broadening potential applications in quantum imaging, lidar, and quantum communication.

**Keywords:** superconducting parallel nanowire single-photon detector; photon-number resolution; spatial-position resolution; LTspice simulation

## 0 引 言

超导并联纳米线单光子探测器 (superconducting

parallel nanowire single-photon detector, PND) 作为一种重要的空间复用型超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD)<sup>[1-3]</sup>, 自 2008 年

收稿日期: 2025-07-13

\* 基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB140015, 23KJB510035)、无锡市创新创业资金“太湖之光”科技攻关计划(基础研究)项目(K20221043, K20221049)、雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室(南京航空航天大学)项目(NJ20230006)资助

由 Divochiy 等<sup>[4]</sup>首次提出以来,因其可通过单路读出实现光子数分辨能力而受到广泛关注<sup>[5-6]</sup>。它通过多个超导纳米线单元并联工作,当光子被某个纳米线吸收时,仅该单元转变为正常态,其余单元仍保持超导态,系统通过识别并联电路总电流的变化来区分入射光子数<sup>[7]</sup>,这种特性使其在量子成像<sup>[8-9]</sup>、激光雷达<sup>[10-11]</sup>和深空通信<sup>[12-13]</sup>等领域展现出良好的应用前景。

随着材料与结构的优化,PND 的性能持续提升。2019 年 Moshkova 等<sup>[14]</sup>制备的 4 像元 PND 实现了 86% 的系统探测效率及约 2 ns 死区时间,体现了 PND 在高效率探测中的进展。然而,传统对称并联结构在高计数率下易受电流重新分布引发的串扰影响,存在闩锁(Latching)风险<sup>[15]</sup>,限制了其带宽应用。为抑制串扰与闩锁,2021 年 Perrenoud 等<sup>[16]</sup>引入了未曝光纳米线以分流电流,使 PND 在单路读出下计数率超过 200 MHz,同时保持 77% 的系统探测效率。2024 年 Stasi 等<sup>[17]</sup>进一步研制出 28 像元 PND,实现 88% 单光子效率、75% 双光子效率和 62% 三光子效率,标志着 PND 在光子数分辨、效率与计数率方面达到新高度<sup>[18-21]</sup>。

然而,尽管 PND 在光子数分辨与高速探测方面取得了较大进步,其结构层面一个根本性的缺陷始终未被克服:所有并联单元在电学上严格对称,导致系统仅能提取光子数目信息,而完全无法区分响应事件的来源。这一结构特性严重制约了 PND 在诸多前沿光子信息技术中的应用价值,如在激光雷达系统中,它限制了探测器从单点走向面阵,无法实现真正的三维分辨与成像<sup>[22]</sup>。现有的解决方案如多路读出阵列虽能实现空间分辨<sup>[23]</sup>,但导致系统复杂度和成本急剧上升;而串联纳米线结构(superconducting series nanowire single-photon detector, SND)又牺牲了计数率和响应速度。

针对这一挑战,本文提出了一种基于阻值梯度标记的超导并联纳米线双分辨单光子探测器。该设计在继承传统 PND 单路读出、低系统复杂度、高计数率等低 SWaP-C 优势<sup>[24]</sup>的基础上,尤其避免了多路读出阵列中随像元数激增的读出通道、低温放大器及电缆所带来的系统体积、重量、复杂度和成本的急剧上升,创新性地为各纳米线单元引入不同阻值的标记电阻,使不同空间位置的单元在响应单光子事件时产生幅度特征化的电脉冲,通过单路读出并分析脉冲幅度,即可同时解析光子数目和空间位置信息<sup>[25]</sup>。结果表明,通过优化并联电阻的阻值比例,可显著增强不同空间组合输出信号的区分度;同时,引入并联电阻结构有效缓解了传统 PND 中的电流分流效应,降低了闩锁风险,提升了器件稳定性,但也不可避免地带来输出幅值与信噪比的下降。本研究为发展双分辨能力的 PND 提供了一种新颖且可行的技术路径,为未来开发大规模、高计数率、具备全信息获取能力的低 SWaP-C 多功能 PND 提供了一种新思路,拓宽了未来量子成像、激光雷达及量子通信等领域的

应用。

## 1 超导并联纳米线双分辨单光子探测器结构设计

超导纳米线的工作原理是纳米线在略低于临界电流的偏置下时处于零电阻的超导态,当纳米线探测到光子后失超转变为电阻态,经过纳米线的电流分流向其他单元和输出端,在输出端产生响应电压<sup>[26]</sup>。当多个单元发生光子响应时,各单元产生的电压将在输出端叠加。传统的超导并联纳米线单光子探测器基于这种响应电压叠加的原理,实现了分辨响应光子数的能力,但无法分辨响应单元的位置信息。

为了实现光子数与空间位置信息的同步分辨,本文设计在传统 PND 结构基础上创新性为每个纳米线像元并联一个具有独特阻值的标记电阻,从而构建一个非对称的电阻网络。单像元响应后电流分流到输出端产生幅值不同的输出脉冲信号;多像元响应时各像元输出信号叠加也各不相同,每一种输出脉冲都唯一一对应响应光子数和空间位置分布。

如图 1 所示为超导并联纳米线双分辨单光子探测器的结构和等效电路图,探测器由  $N$  个超导纳米线单元并联而成,每个单元是由一根蜿蜒结构的超导纳米线并联电阻  $R_p$  后再串联一个相同阻值的电阻  $R_s$  构成。其中蜿蜒结构的超导纳米线可以等效为一个开关控制的电阻  $R_n$  串联动态电感  $L_k$ ,  $N$  个并联电阻分别标记为  $R_{p1} \sim R_{pN}$ 。所有单元由同一偏置电路提供偏置电流  $I_B$ , 并经由同一电路输出信号  $V_{out}$ 。在该结构中,并联电阻  $R_p$  为纳米线提供了一个额外的稳定电流通路,从根本上抑制了闩锁效应的发生。闩锁的本质是热电正反馈导致的热失控,在传统 PND 结构中,一个单元的失超会迫使电流瞬间转移至其他单元,引发电流过冲和级联失超。同时,失超区域因焦耳热剧增且难以消散,导致器件持续处于高阻态。引入  $R_p$  后,这一正反馈过程被有效阻断,失超瞬间,电流优先分流至  $R_p$  通路,而

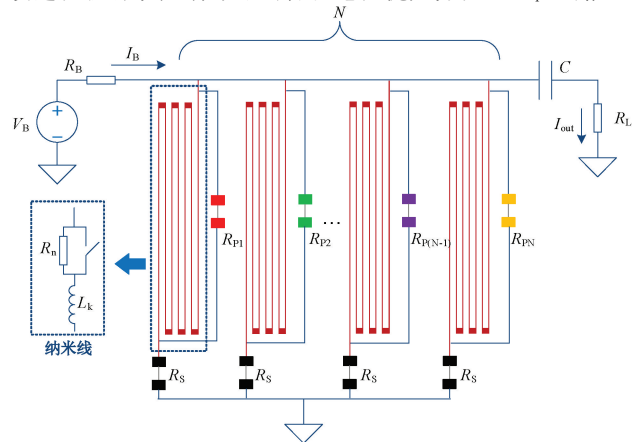


图 1 超导并联纳米线双分辨单光子探测器结构和等效电路图  
Fig. 1 Structure and equivalent circuit diagram of superconducting dual-resolution single-photon detectors with parallel nanowires

非全部涌入其他纳米线单元。这抑制了其他单元中的电流过冲, 确保其电流始终低于超导临界值, 从而避免了级联失超和热失控的发生, 显著提高了探测器在高偏置电流下的工作稳定性<sup>[27-29]</sup>。

如表 1 所示为  $N$  像元双分辨探测器可分辨光子个数和空间位置种数及并联电阻阻值比值示例。以 4 像元超导并联纳米线双分辨单光子探测器为例, 将 4 个像元的并联电阻  $R_{P_1}, R_{P_2}, R_{P_3}, R_{P_4}$  的阻值比例分别设置为 1:2:4:8, 其他电路参数保持不变, 那么在输出端产生的单像元响应信号有 4 种, 两像元响应信号有 6 种组合, 三像元响应信号有 4 种组合, 四像元响应信号有 1 种, 对应共 15 种空间位置分布。

表 1 N-PND 可分辨光子个数和空间位置种数及  
并联电阻阻值比值示例

Table 1 Photon-number and spatial position resolution, and parallel resistor value ratio examples in N-PND

像元数/ 个	分辨光子 个数/个	分辨空间位置 种数/种	并联电阻阻值 比值示例/ $\Omega$
2	2	3	1:2
3	3	7	1:2:4
4	4	15	1:2:4:8
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$N$	$N$	$2^N - 1$	...

## 2 LTspice 电路模型仿真

利用 LTspice 软件建立等效电路模型来模拟超导并联纳米线双分辨单光子探测器的光子响应过程<sup>[30-31]</sup>。首先根据 2007 年 Yang 等<sup>[32]</sup>提出的 SNSPD 的电热模型里的热模型和电模型来进行模拟分析, 可以较为准确的来描述 SNSPD 探测光子的过程, 热模型分析了焦耳热在光子吸收过程中的作用, 产生的热阻引起超导纳米线的失超, 进而产生电脉冲信号。热模型如式(1)所示。

$$J^2 \rho + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{d} (T - T_{\text{sub}}) = \frac{\partial c T}{\partial t} \quad (1)$$

其中,  $J$  是纳米线的电流密度,  $\rho$  是电阻率,  $\kappa$  是纳米线的热导率,  $\alpha$  是纳米线与衬底之间的热边界电导率,  $d$  是纳米线的厚度,  $T_{\text{sub}}$  是衬底的温度,  $c$  是纳米线单位体积的具体热量。

电模型为纳米线的单元可等效为可变电阻和动态电感串联的关系。电模型如式(2)所示。

$$C_{\text{bt}} \left( \frac{d^2 L_k I}{dt^2} + \frac{d(IR_n)}{dt} + Z_0 \frac{dI}{dt} \right) = I_{\text{bias}} - I \quad (2)$$

其中,  $C_{\text{bt}}$  是读出电路的耦合电容,  $L_k$  是纳米线的动态电感,  $R_n$  是纳米线的电阻,  $Z_0$  是读出电路的等效负载。

实际制备探测器的纳米线通常由长为 100~300  $\mu\text{m}$ ,

宽为 40~120 nm, 厚 4~6 nm 的 NbN 或 NbTiN 薄膜构成<sup>[33-34]</sup>, 并联和串联电阻的材料为 Ti 金属薄膜, 通过调整电阻的几何尺寸(长宽比以及薄膜厚度)来调节电阻阻值。表 2 列出了基于实际制备的 SNSPD 模型的参数, 其中 NbN 纳米线宽度和厚度分别为 100 和 4 nm, 超导临界温度  $T_c$  为 10.5 K, 超导临界电流  $I_c$  为 20  $\mu\text{A}$ , 临界电流密度  $J_c$  为 50  $\text{GA}/\text{m}^2$ , 每个像元的纳米线长度  $L$  约为 190  $\mu\text{m}$ 。

表 2 SNSPD 的模型参数数值

Table 2 Model parameter values of the SNSPD

参数名	物理意义	参数数值	单位
$T_{\text{sub}}$	衬底温度	2	K
$T_c$	超导临界温度	10.5	K
$J_c$	临界电流密度	50	$\text{GA}/\text{m}^2$
$I_c$	超导临界电流	20	$\mu\text{A}$
$L_k$	动态电感	100	nH
$L_{\text{sq}}$	方块电感	53	$\text{pH}/\text{sq}$
$R_{\text{sq}}$	方块电阻	400	$\Omega/\text{sq}$
$w$	宽度	100	nm
$d$	厚度	4	nm
$L$	长度	190	$\mu\text{m}$

依据参数搭建传统 4 像元 PND 和 4 像元双分辨的 PND 的电路模型, 各模型都有 4 个超导纳米线像元, 在每个像元的纳米线的一端都串联一个阻值为  $R_s = 50 \Omega$  的电阻<sup>[35]</sup>。将可实现双分辨的 PND 的 4 个像元的并联电阻的阻值  $R_{P_1}, R_{P_2}, R_{P_3}, R_{P_4}$  分别设置为 100、200、400 和 800  $\Omega$ , 电路的偏置电流是由恒压源  $V_B = 1.443 \text{ V}$  串联电阻  $R_B = 50 \text{ k}\Omega$  提供, 即偏置电流  $I_B = V_B/R_B = 28.86 \mu\text{A}$ , 电路输出端接读出等效负载  $R_L = 50 \Omega$ , 等效电容  $C = 100 \text{ nF}$ 。如图 2 为传统 4 像元 PND 和 4 像元双分辨的 PND 的输出电压脉冲信号。

图 2(a)所示为分别仿真模拟光子入射引起 1~4 个像元响应产生的输出脉冲电压随时间变化的曲线。响应脉冲电压峰值近似表示如式(3)所示。

$$V_{\text{out}}(n) = n \cdot V_1 \quad (3)$$

其中,  $V_1$  是单个像元响应时的脉冲电压峰值,  $n$  为光子入射时响应的像元数。

当多个像元的纳米线同时探测到光子时, 每条像元产生的脉冲电压在输出端叠加得到的电压脉冲值  $V_{\text{out}}$  与光子数  $n$  成正比, 因此通过输出端的脉冲信号幅度来判定响应光子个数, 从而实现光子数分辨。可实现双分辨的 4-PND 的输出脉冲电压随时间变化的结果如图 2(b)所示。图中采用二进制码 1、0 来表示各像元状态(“1”为响应, “0”为未响应), 从左至右分别对应表示第 1~4 个像元的响应状态。当检测到 1 个光子时响应位置有 4 种(1000, 0100, 0010,

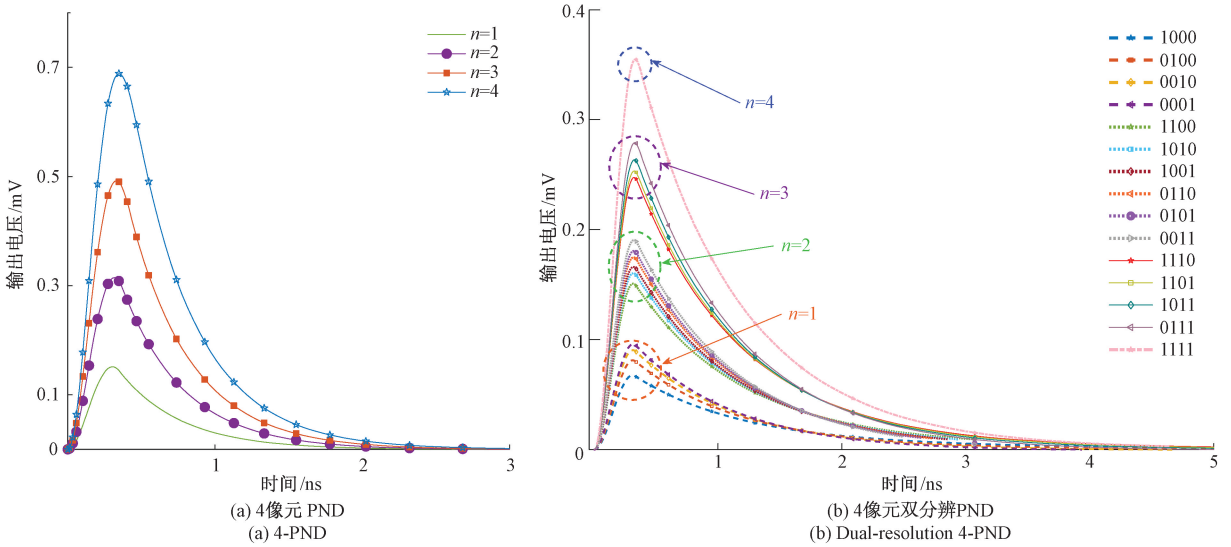


图 2 输出电压脉冲信号  
Fig. 2 Output voltage pulse signals

0001), 2 个光子时响应位置有 6 种 (1100, 1010, 1001, 0110, 0101, 0011), 3 个光子时响应位置有 4 种 (1110, 1101, 1011, 0111), 4 个光子全响应时响应位置有 1 种 (1111)。这是由于各像元并联电阻阻值差异导致各像元响应输出电压脉冲幅度不同, 叠加后的输出信号也不同, 从而能够实现响应光子空间位置的分辨。仿真结果显示, 在相同光子数 (相同  $n$ ) 下, 不同空间位置组合的输出脉冲幅度差异较小 (约  $5 \sim 15 \mu\text{V}$ ), 而相邻光子数 ( $n$  与  $n+1$ ) 间的幅度差异显著 (约  $70 \sim 100 \mu\text{V}$ )。

为评估该结构拓展更多像元数的可行性, 进一步分析了  $N=8$  时的信号峰值分布。如图 3 所示为 8 像元输出电压峰值分布直方图, 系统理论上可产生 255 种独特的输出电压状态。通过仿真分析得到, 输出电压峰值与总光子数  $n$  之间存在高度线性关系, 线性拟合为  $y = 67.65x - 14.78$ ,  $R^2 > 0.99$ , 所有相邻  $n$  值间的分离度  $d' > 2.3$ , 确保了光子数分辨的可靠性。然而, 在固定光子数  $n$  下, 不同空间位置组合产生的输出电压分布范围较窄, 导致其微观分离度 ( $d'$ ) 普遍小于 1, 所以期望系统能无歧义地分辨所有 255 种状态是极其困难的。

尽管如此, 聚类分析<sup>[36]</sup>表明, 输出电压并非均匀分布, 而是自然地汇聚成若干个分离良好的幅度集群, 这表明系统虽难以区分每一个细微的位置差异, 但能够有效识别出差异显著的空间分布模式。因此, 本设计将空间位置信息有效地编码为幅度维度上连续且特征丰富的模拟信号, 后续利用适当的数据处理算法可以实现高精度分辨。

### 3 参数优化对输出性能的影响

为了研究可双分辨的 PND 的纳米线动态电感、串联电阻和并联电阻对探测器的输出信噪比、探测速度、分辨率等性能的影响, 将探测器的等效电路分为响应单元

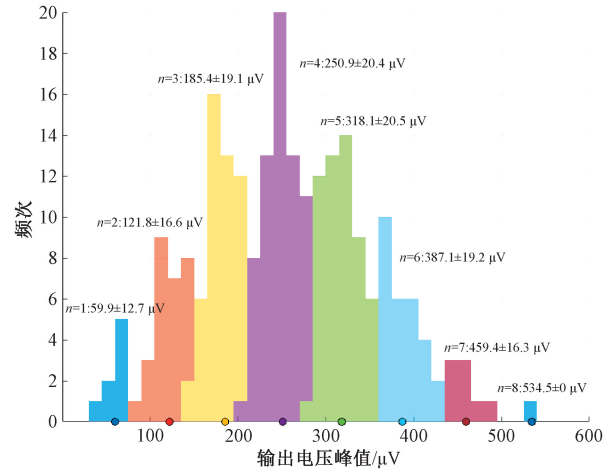
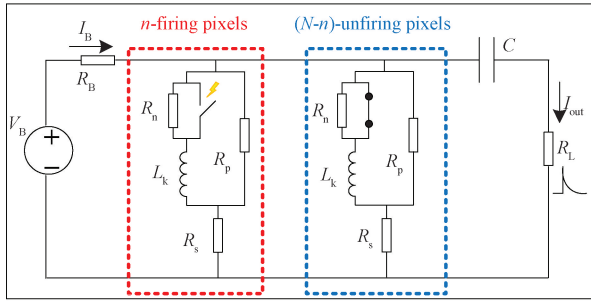
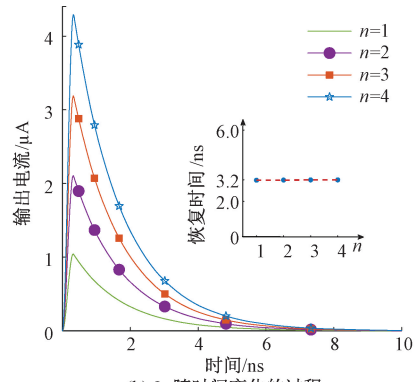


图 3 8 像元双分辨 PND 输出电压峰值分布直方图  
Fig. 3 Histogram of the output voltage peak value distribution of 8 pixels dual-resolution detector

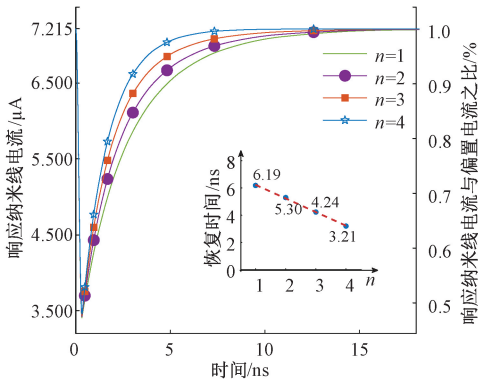
(firing pixels)、未响应单元 (unfiring pixels) 和输出端, 如图 4(a) 为等效电路图,  $n$  为响应单元的个数,  $N-n$  为未响应单元的个数。通过仿真光子响应瞬间各分支的电流变化, 研究上述参数对探测器性能的影响。这里将并联电阻  $R_p$  设置成相同的阻值为  $100 \Omega$ , 其他参数不变, 分别模拟仿真 4 像元超导并联纳米线结构的各光子响应时的各支路电流变化过程。图 4(b)~(d) 分别显示  $n$  由 1 增加到 4, 4-PND 的输出端的电流  $I_{out}$ 、响应纳米线的电流  $I_f$  和未响应纳米线的电流  $I_{uf}$  随时间变化的仿真结果。在光子响应瞬间, 响应单元纳米线由超导态转正常态,  $I_f$  快速大幅下降, 电流一部分分流向未响应单元, 大部分流向输出端, 导致  $I_{uf}$  缓慢上升,  $I_{out}$  快速上升, 并且  $I_{uf}$  与  $I_{out}$  的峰值随着  $n$  值近似等比例增大。在恢复超导态的过程中, 随着光子数  $n$  的增大, 由于响应单元纳米线动态电感并联, 总等



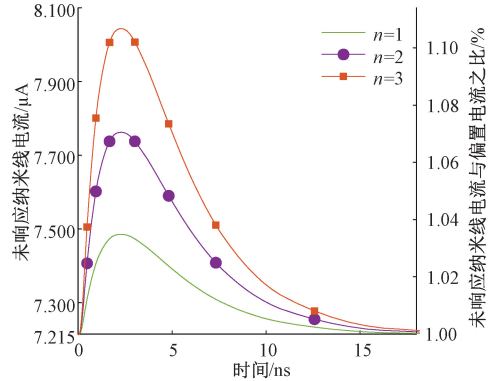
(a) 等效电路图  
(a) Equivalent circuit diagram



(b)  $I_{out}$  随时间变化的过程  
(b) Time evolution of  $I_{out}$



(c)  $I_f$  随时间变化的过程  
(c) Time evolution of  $I_f$



(d)  $I_{uf}$  随时间变化的过程  
(d) Time evolution of  $I_{uf}$

图 4 等效电路图及其光子响应瞬间各分支的电流变化

Fig. 4 Equivalent circuit diagram and current changes in each branch at the instant of photon response

效电感变小,导致  $I_f$  的恢复时间  $\tau$  变短;而  $I_{out}$  的恢复时间由探测器总动态电感决定,因此输出信号恢复时间  $\tau$  维持不变。

对传统无并联电阻  $R_p$  的 PND、并联电阻  $R_p = 100 \Omega$  的 PND 和并联电阻  $R_p = 200 \Omega$  的 PND 探测器分别进行仿真,当单个像元发生光子响应,得到的响应纳米线的电流  $I_f$ 、未响应纳米线的电流  $I_{uf}$  和读出端输出电压  $V_{out}$  的变化情况如图 5 所示。如图 5(a)所示,相较于传统 PND,增加  $R_p$  对光子响应瞬间  $I_f$  的下降无影响,但它的恢复时间  $\tau$  变大,且随着  $R_p$  越大,恢复时间越接近无  $R_p$  的 PND。如图 5(b)所示,增加  $R_p$  后  $I_{uf}$  的幅值明显减小,从而减小了分流到其他分路的漏电流  $\delta I_k (\delta I_k = I_{uf} - I_B)$ ,因此可以有效缓解 PND 的电流分流效应;当  $R_p$  的阻值越小,  $\delta I_k$  越小。如图 5(c)所示,在增加  $R_p$  后,输出电压减小,信噪比降低,  $R_p$  越小,脉冲电压越小,并且恢复时间更长。因此,相较于传统 PND,并联电阻可降低电流分流的效应,将有助于提高探测器的系统检测效率,但输出信噪比有所下降,并联电阻越大,信噪比相对更好,恢复更快。另外,传统 PND 不能设置较大偏置电流,容易导致探测器出现门锁,增加  $R_p$  后即给纳米线搭建了电流分流支路,可以有效

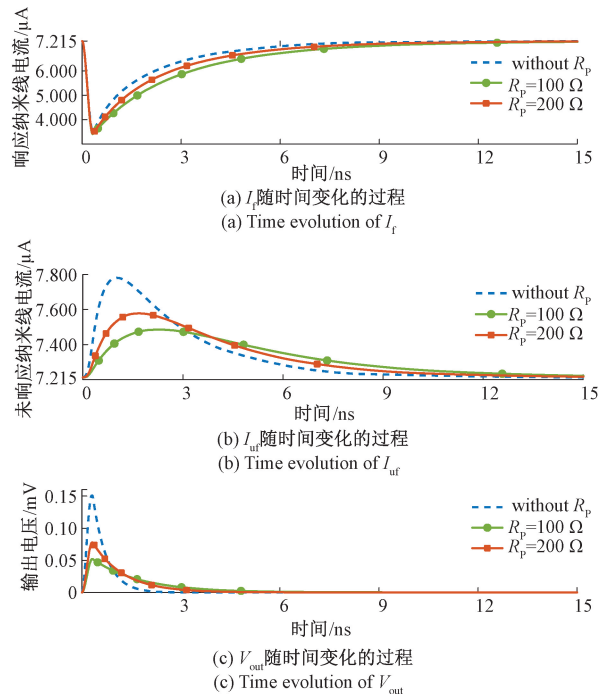


图 5 各分支电流随时间变化的过程

Fig. 5 The process of current changes in each branch over time

的解决门锁效应。

图 6(a)和(b)分别模拟了并联电阻  $R_p$  和串联电阻  $R_s$  对探测器输出端信号 Peak  $V_{out}$  的影响。在单光子响应的

情况下,当各像元纳米线两端并联的电阻越大,输出电压脉冲峰值越大;当各像元纳米线的串联电阻越大,输出电压脉冲峰值越小。

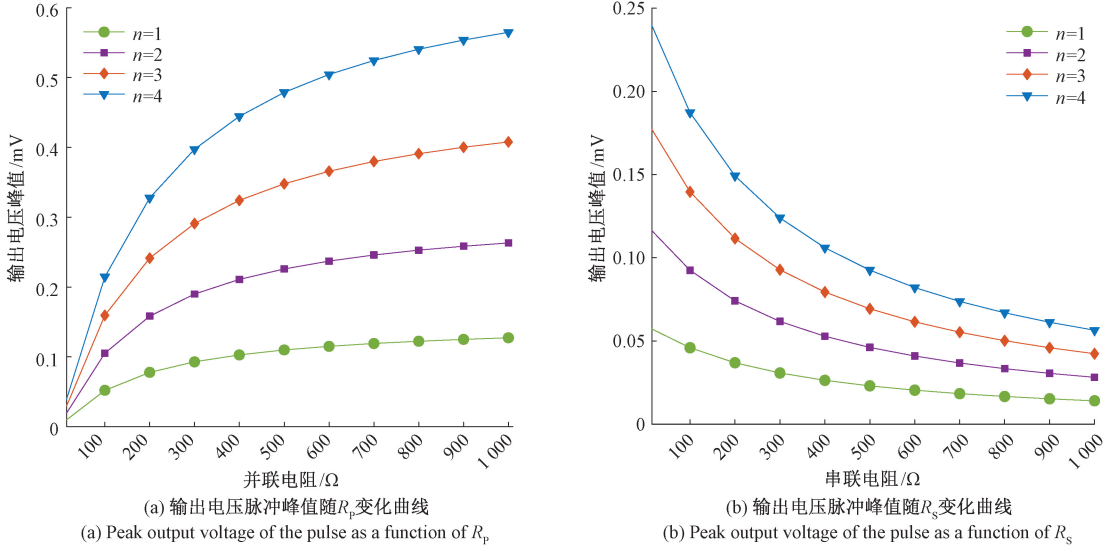


图 6 并联电阻和串联电阻对探测器输出端信号的影响

Fig. 6 The influence of parallel resistors and series resistors on the signal at the output terminal of the detector

图 7 比较了 3 组不同并联电阻比值组合情况下的各光子响应时的电压脉冲峰值,将并联电阻  $R_{p1}$  都设置为  $100 \Omega$ ,其余的阻值按各比值设置,图中可表明当各像元并联的电阻阻值差异越大,输出脉冲的差异也越明显。在两个像元同时响应的情况下,3 种比值的脉冲电压变化率如

小图所示,这里将 1100 的光子入射情况的输出电压值设为 1,其余情况如图中增长所示,在比值为 1:2:4:8 的情况下,各响应对应输出的脉冲差异相较于其他两种情况的变化率更大更均匀,因此为了能够得到更高的分辨率时可以设置阻值比例差异大的并联电阻。

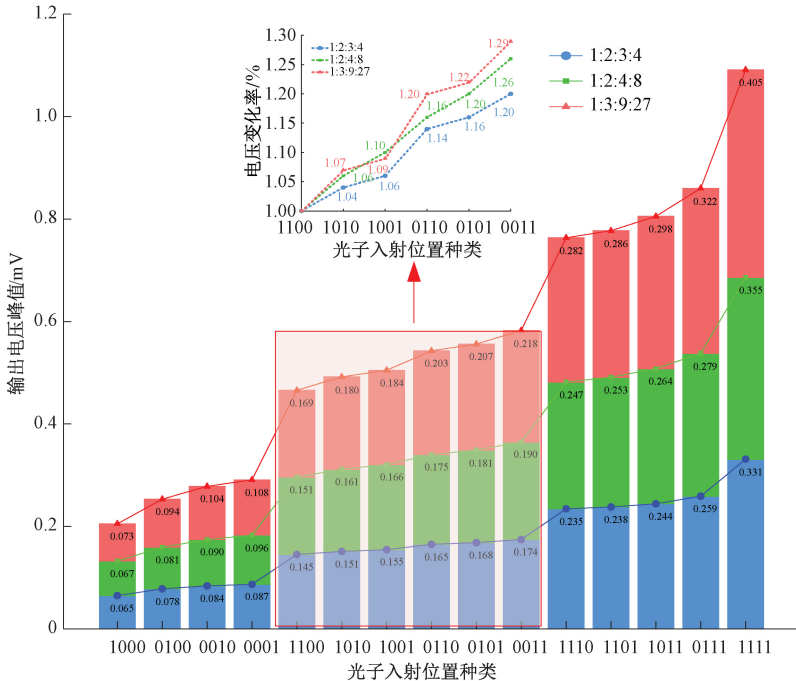
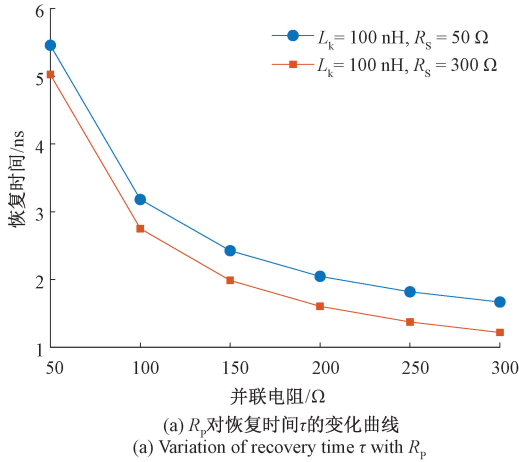


图 7 不同并联电阻阻值组合下各光子响应时的 Peak  $V_{out}$

Fig. 7 Peak  $V_{out}$  corresponding to each photon response for different parallel resistor value combinations

如图 8 显示了  $R_p$ 、 $R_s$  与  $L_k$  这 3 个参数对探测器恢复时间  $\tau$  的影响。图 8(a)模拟了  $L_k = 100 \text{ nH}$  的情况下,  $R_s = 50 \text{ }\Omega$  和  $R_s = 300 \text{ }\Omega$  两种不同的 4-PND 在单光子响应时输出端的恢复时间,当其他参数保持不变的情况下,随着  $R_p$  阻值的增大,  $\tau$  逐渐减少;对于阻值相同的  $R_p$ , 当  $R_s$  的阻值越大,  $\tau$  也越小。图 8(b)模拟了在  $R_p = 50 \text{ }\Omega$ ,  $R_s = 300 \text{ }\Omega$  和  $R_p = 300 \text{ }\Omega$ ,  $R_s = 50 \text{ }\Omega$  这两种不同的组合情况



下,恢复时间与动态电感的关系,结果表明  $L_k$  与  $\tau$  呈现线性关系。通过仿真模拟得到  $\tau$  等于其动态电感与其之间连接的阻抗之比即  $\tau = L_k / R_{eq}$ ,  $R_{eq}$  表示该动态电感所在支路的等效负载阻抗,该阻抗由串联电阻、并联电阻及其与其他像元结构之间的电流耦合关系共同决定,后者的  $\tau$  更小,所以相较于串联电阻  $R_s$ , 并联电阻  $R_p$  在探测器中对于恢复时间的影响更大。

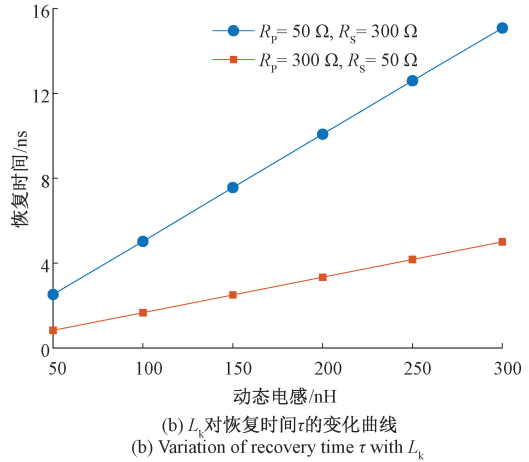


图 8 各参数对探测器恢复时间的影响

Fig. 8 The influence of various parameters on the recovery time of the detector

#### 4 位置分辨误码率的蒙特卡洛仿真分析

为定量评估本探测器结构的位置分辨能力及其抗干扰性能,本节采用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法对 15 种位置码的误码率(bit error rate, BER)进行系统仿真<sup>[37-38]</sup>。该方法通过大量随机采样来模拟系统中的不确定性,从而统计性地确定其性能上限。

仿真基于第 2 章获得的 15 种位置码的理想脉冲响应数据,提取了每种位置码输出脉冲的峰值电压作为判别特征,其分布范围从 67.5~354.8  $\mu\text{V}$ ,其中 1101 光子入射情况与相邻模式的相对间距最小仅为 2.4%,而 1111 的光子入射情况具有最大峰值和间距。在每一次蒙特卡洛试验中,向理想峰值电压注入加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN),该噪声模型旨在模拟系统等效输入噪声的综合效应,用最小距离判别准则,将叠加噪声后的信号归类于欧氏距离最近的模板所对应的位置码。对每种位置码和每个信噪比条件均进行 10 000 次重复试验,通过统计误判次数计算误码率。

蒙特卡洛仿真结果如图 9 所示,仿真结果表明,系统误码率随信噪比提升而显著下降,但在 30 dB 信噪比下平均误码率仍高达 29.4%,距实用化要求( $\text{BER} < 10^{-4}$ )差距显著。1111 的光子入射情况因峰值电压高、间距大,其 BER 最低可达  $3.00 \times 10^{-4}$ ;而 1101 的光子入射情况则因与相邻模式间距过小,BER 始终高达 61.1%,成为系统主要瓶颈。进一步的相关性分析表明,峰值间距与误码率之

间存在强负相关关系,相关系数为 -0.652,这既验证了幅度分辨原理的正确性,也揭示了增大位置码间的峰值电压间距能有效降低系统的误码率,同时也证明了峰值间距过小是制约系统性能的关键瓶颈。

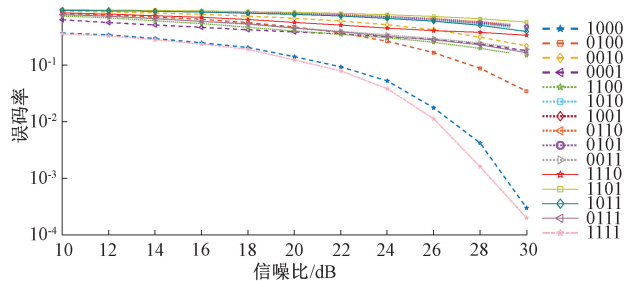


图 9 15 种位置码的误码率随信噪比的变化

Fig. 9 The error rate of 15 types of position codes varies with the signal-to-noise ratio

本文所采用的 1:2:4:8 的并联电阻阻值分布,虽实现了一定程度的幅度区分,但部分相邻模式电压间距过小,在未来可采用非等比非均匀阻值的分配策略,通过优化算法最大化电压间距,从根本上扩大信号间的可区分度,并且我们也可以采取多参数联合分析,对脉冲高度、脉冲宽度以及上升时间等替代单一幅度判别,通过增加特征维度来提升噪声环境下的分辨能力。另外在输出端集成高性能低温低噪声放大器,在信号传输至室温读出系统前对其进行预放大,有效压制后续电路引入的噪声,从而显著提高系统的信噪比来降低误码率。

## 5 结 论

本文针对传统超导并联纳米线单光子探测器无法实现空间位置分辨的局限,提出并设计了一种具备光子数与空间位置双分辨能力的新型探测器结构。通过引入非对称阻值标记策略,在保持单路读出和低系统复杂度的基础上,实现了多维度信息的同时获取。通过 LTspice 仿真分析验证了 4 像元超导并联纳米线单光子探测器可分辨最多 4 个光子的事件及 15 种响应信号的叠加组合,验证了该结构的可行性与分辨机制。拓展分析显示,8 像元系统也展现出 255 种状态的理论容量与良好的光子数线性响应,为基于智能算法的超分辨识别提供了数据基础。数据分析表明,并联电阻差异显著影响空间分辨能力,串联电阻与动态电感则共同调控信号幅值与响应速度。通过蒙特卡洛方法分析得到当前系统误码率较高,主要源于响应模式间电压间距不足,未来需从阻值分布优化、集成前置放大与低噪声读出等方面协同提升综合性能。该研究为高分辨率量子成像、激光雷达与深空通信提供了新型探测器解决方案,并为发展大规模低 SWaP-C 多维 PND 系统指明了方向。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] ALLMARAS J P, BEYER A D, BRIGGS R M, et al. Large-area 64-pixel array of WSi superconducting nanowire single photon detectors[C]. *CLEO: Science and Innovations*. Optica Publishing Group, 2017:1-2.
- [3] GUAN Y Q, LI H, ZHANG L, et al. SNSPD array with single-channel readout based on compressive sensing[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(9): 3102-3109.
- [4] DIVOCHIY A, MARSILI F, BITAULD D, et al. Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5): 302-306.
- [5] HUANG J, ZHANG X Y, ZHANG W J, et al. Improving photon number resolvability of a superconducting nanowire detector array using a level comparator circuit [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2023, 37(5): 5005.
- [6] SCHAPELER T, LAMBERTY N, HUMMEL T, et al. Electrical trace analysis of superconducting nanowire photon-number-resolving detectors[J]. *Physical Review Applied*, 2024, 22(1): 014024.
- [7] MARSILI F, BITAULD D, FIORE A, et al. Superconducting parallel nanowire detector with photon number resolving functionality[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(2/3): 334-344.
- [8] TAYLOR G G, MOROZOV D, GEMMELL N R, et al. Photon counting LIDAR at 2.3  $\mu\text{m}$  wavelength with superconducting nanowires[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38147-38158.
- [9] TAYLOR G G, MCCARTHY A, KORZH B, et al. Long-range depth imaging with 13ps temporal resolution using a superconducting nanowire single photon detector[C]. *CLEO: Science and Innovations*. Optica Publishing Group, 2020.
- [10] ZHANG B, GUAN Y Q, XIA L H, et al. An all-day lidar for detecting soft targets over 100 km based on superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2021, 34(3): 034005.
- [11] LI H CH, ZHENG K M, GE R, et al. Noise-tolerant LiDAR approaching the standard quantum-limited precision[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 138.
- [12] KHATRI F I, ROBINSON B S, SEMPRUCCI M D, et al. Lunar laser communication demonstration operations architecture[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 111: 77-83.
- [13] SHI Z Y, WU X W, YANG L, et al. Performance analysis of PPM-SNSPD system for deep space optical communications [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73: 6221-6235.
- [14] MOSHKOVA M, DIVOCHIY A, MOROZOV P, et al. High-performance superconducting photon-number-resolving detectors with 86% system efficiency at telecom range[J]. *Journal of the Optical Society America B*, 2019, 36(3): B20-B25.
- [15] ANNUNZIATA A J, QUARANTA O, SANTAVICCA D F, et al. Reset dynamics and latching in niobium superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 084507.
- [16] PERRENOUD M, CALOZ M, AMRI E, et al. Operation of parallel SNSPDs at high detection rates [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2021, 34(2): 024002.
- [17] STASI L, TAHER T, RESTA G V, et al. Enhanced detection rate and high photon-number efficiencies with a scalable parallel SNSPD[J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(1): 320-329.
- [18] 陈敬学, 李浩. 高速超导纳米线单光子探测器研究进展[J]. *功能材料与器件学报*, 2025, 31(1): 1-10.  
CHEN J X, LI H. Research progress on high speed superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2025, 31(1): 1-10.
- [19] TAN J R, LI H CH, ZHANG L B, et al. Large-area SNSPD with a high count rate enhanced by a discharge acceleration circuit [J]. *Applied Physics Letters*,

- 2023, 123(14): 142601.
- [20] XIE J, ZHANG H B. Temporal and photon number resolution of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(7): 113.
- [21] KONG L D, ZHANG T Z, LIU X Y, et al. Large-inductance superconducting microstrip photon detector enabling 10 photon-number resolution[J]. *Advanced Photonics*, 2024, 6(1): 016004-016004.
- [22] 周慧, 张成俊, 吕超林, 等. 基于超导纳米线单光子探测技术的成像研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 70-85.
- ZHOU H, ZHANG CH J, LYU CH L, et al. Recent progress of imaging applications based on superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 70-85.
- [23] WOLLMAN E E, VERMA V B, LITA A E, et al. Kilopixel array of superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35279-35289.
- [24] 罗云, 陈军, 黄伟, 等. HOT 器件用微型线性分置式斯特林制冷机[J]. *红外技术*, 2025, 47(4): 517-522.
- LUO Y, CHEN J, HUANG W, et al. Micro linear stirling cooler for HOT IR detectors [J]. *Infrared Technology*, 2025, 47(4): 517-522.
- [25] HE G L, LI H CH, YIN R, et al. Simultaneous resolution of photon numbers and positions with series-connected superconducting nanowires [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(12): 124001.
- [26] 张彪, 陈奇, 管焰秋, 等. 超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展[J]. *物理学报*, 2021, 70(19): 294-312.
- ZHANG B, CHEN Q, GUAN Y Q, et al. Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(19): 294-312.
- [27] 陶旭. 超导纳米线单光子探测器高效高速特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- TAO X. High efficiency and high speed characteristics of the superconducting nanowire single photon detector[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [28] TAO X, HAO H, LI X, et al. Characterize the speed of a photon-number-resolving superconducting nanowire detector[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 1-8.
- [29] HALDAR S, SEHRAWAT A, BALASUBRAMANIAN K B. Modeling the effect of superconductor properties on sensitivity and responsivity of superconducting nanowire single photon detector [J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(17): 173907.
- [30] BERGGREN K K, ZHAO Q Y, ABEBE N, et al. A superconducting nanowire can be modeled by using SPICE[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31(5): 055010.
- [31] SONI A, BHARGAV A M, PRATAP P, et al. Effects of extrinsic parameters on superconducting nanowire single-photon detector output-A study towards developing read-out circuit [J]. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 2025, 632: 1354689.
- [32] 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.
- [33] CHANG J, LOS J W N, TENORIO-PEARL J O, et al. Detecting telecom single photons with 99.5-2.07+0.5% system detection efficiency and high time resolution[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(3): 036114.
- [34] ZHANG W J, YOU L X, LI H, et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60(12): 120314.
- [35] MARSILI F, BITAUD D, GAGGERO A, et al. Physics and application of photon number resolving detectors based on superconducting parallel nanowires[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(4): 5022.
- [36] 彭文静, 郑迪, 蔡慧, 等. 基于改进高斯混合模型的光伏短时波动游程聚类[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(7): 126-134.
- PENG W J, ZHENG D, CAI H, et al. Run clustering for short-term fluctuation of photovoltaic based on improved Gaussian mixture model [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(7): 126-134.
- [37] 李明. 基于蒙特卡洛法的外径千分尺测量误差校准[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(5): 24-28.
- LI M. Measurement error calibration of micrometer based on Monte Carlo method [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(5): 24-28.
- [38] DERENZO S E. Monte Carlo calculations of cryogenic photodetector readout of scintillating GaAs for dark matter detection [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, 1068: 169791.

### 作者简介

陶旭(通信作者), 博士, 讲师, 主要研究方向为超导电子器件、光子检测技术及其应用等。

E-mail: taoxu@cwuxu.edu.cn

吴焯, 硕士研究生, 主要研究方向为超导电子学、超导单光子探测器及其应用。

E-mail: 417801190@qq.com

胡长雨, 博士, 讲师, 主要研究方向为雷达成像。

E-mail: changyu\_hu@cwuxu.edu.cn