

研究论文

基于超导纳米线的可片上集成低温温度计

郇庆昌¹, 肖尧¹, 张登科¹, 张琪¹, 范云茹², 郭光灿², 周强^{1,2,*}

(1. 天府绛溪实验室量子互联网前沿研究中心, 成都 641419; 2. 电子科技大学基础与前沿研究院, 成都 611731)

摘要: 超导纳米线因高灵敏度、紧凑设计和低噪声特性, 在量子计算、超导电子学及低温物理学中具有重要应用。本文提出并实现了一种基于栅控超导纳米线的低温温度计, 通过栅极电场调控, 实现了液氦温区附近的高精度温度测量。实验结果表明, 该器件在 2.5~6.2 K 范围内稳定工作, 最低噪声等效温差 (NETD) 为 5.5 mK, 最大灵敏度达 4.51×10^5 cps/K, 并具备亚毫开尔文级分辨率的潜力。器件具备可片上集成、快速响应和动态范围可调等优势, 适用于低温温度测量与量子芯片片上温度监测等前沿应用, 为新型电场可调型超导电子学器件的发展提供了实验基础与理论支撑。

关键词: 超导纳米线; 低温温度计; 电场调控; Allan 偏差

中图分类号: O511

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2509070

CSTR: 32180.14.jfmd.2509070

An integrable low-temperature thermometer based on superconducting nanowires

HUAN Qingchang¹, XIAO Yao¹, ZHANG Dengke¹, ZHANG Qi¹,
FAN Yunru², GUO Guangcan², ZHOU Qiang^{1,2,*}(1. Research Center for Quantum Internet, Tianfu Jiangxi Laboratory, Chengdu 641419, China;
2. Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Superconducting nanowires are widely used in quantum computing, superconducting electronics, and low-temperature physics due to their high sensitivity, compact footprint, and low noise. Here, we present a gate-tunable superconducting nanowire thermometer that enables high-precision temperature measurements in the liquid-helium regime by applying a gate voltage. Experimental results demonstrate stable operation in the 2.5-6.2 K range, with a maximum sensitivity of 4.51×10^5 cps/K, indicating the potential for sub-millikelvin resolution. The device further exhibits a minimum noise-

收稿日期: 2025-09-18; 修订日期: 2025-10-20

基金项目: 国家自然科学基金 (62475039); 四川省科技计划项目 (2023YFSY0062, 2024YFHZ0370); 国家科技重大专项“量子通信与量子计算机专项” (2024ZD0300800); 天府绛溪实验室自研项目 (TFJX-ZD-2024-002).

作者简介: 郇庆昌 (1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为超导量子器件 (E-mail: qc_huan@outlook.com).

通信作者: 周强 (1984—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为量子互联网系统平台、量子互联网关键器件、量子互联网应用技术 (E-mail: zhouqiang@uestc.edu.cn).

equivalent temperature difference (NETD) of 5.5 mK, corresponding to millikelvin-level measurement accuracy. Its on-chip integrability, fast response, and tunable performance make it a promising solution for low-temperature sensing and on-chip thermal monitoring in quantum chips. This work provides an experimental platform and theoretical basis for electric-field-controlled superconducting electronics and highlights the potential of gate-controlled nanowires for integrated cryogenic sensing technologies.

Key words: superconducting nanowire; cryogenic thermometer; gate-controlled supercurrent; Allan deviation

0 引言

低温温度测量是量子计算、超导电子学和凝聚态物理研究中的关键技术之一。随着量子器件向大规模集成化方向发展,对低温温度计的灵敏度、响应速度、稳定性及可集成性等提出了更高要求^[1-2]。传统低温温度计主要基于电阻温度依赖性(如氧化钨电阻温度计、铽铁电阻温度计)、噪声谱分析或超导转变边沿效应等^[1-3],但普遍存在响应时间长、体积较大或需复杂电路等问题,难以满足片上快速测温需求。近年来,超导材料因其零电阻特性与量子极限灵敏度的响应能力,在低温测量领域展现出独特优势。例如,超导量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)凭借对磁通变化的极高灵敏度,可实现 μK 级高精度测温。但其对高质量约瑟夫森结及复杂多层结构工艺的依赖,限制了其在芯片级的大规模集成应用。而超导纳米线因其独特的电输运特性(如超导—正常态相变临界电流的强温度依赖性)成为量子传感领域的热点。当前超导纳米线的研究主要聚焦于超导纳米线单光子探测器(Superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD),其通过监测纳米线从超导态到正常态的转变脉冲来探测单光子^[4-8]。这一器件的成功表明,超导纳米线中由光子、温度或电场等外部物理因素诱导的相变可作为传感器的物理基础。然而, SNSPD的暗计数率虽然与温度具有强相关性,但响应区间极其有限,并不适用于直接的温度测量。

近年来,已有部分研究尝试利用超导纳米线的超流—温度关系实现低温测量。其中, Allmaras等^[7]提出了一种基于温度—临界电流映射的方法,通过测量开关电流随温度的变化来实现局域温度标定,主要用于研究超导薄膜的热传导与冷却过程,然而每次测量需要进行电流扫描,不适用于更通用

的场景。而 Zgirski等^[8]开发了一种基于铝超导纳米桥超导状态切换概率的开关式温度计,提出了两种测量模式:一种为基于开关电流的直接温度标定法,另一种为通过统计开关概率实现的概率式测温法。前者需反复进行电流扫描,后者依赖大量统计数据,两者均对驱动电流稳定性和系统标定精度要求较高,测量流程相对复杂,主要用于探索超导纳米结构的热动力学与准粒子扩散机制。

栅极电场调控微纳结构超导电性的研究为基于纳米线实现低温温度测量提供了新的思路。2018年, Francesco Giazotto小组首次报道了基于金属超导薄膜制备的超流晶体管^[9],通过栅极电场对超导电流的实现了抑制调控,且该现象维持到临界温度的85%。该报道首次证明了外部电场对于超导体实现超导电性调控的可行性,并为开发下一代超导电子器件提供了理论和实验基础,同时,对于多种超导器件的设计以及改进具有一定的参考价值,比如约瑟夫森结、超导量子干涉仪、单光子探测器等。然而,栅极调控超导电流(Gate-controlled supercurrent, GCS)的物理机制仍存在极大争议^[9-22],主流的解释包含电子场激发、声子热、相位波动、电场直接效应等。实际上,在 SNSPD工作模式中,光子吸收引发的热电子扩散过程会显著改变纳米线局域电阻,进而触发可检测的电压脉冲,从而实现单光子级灵敏度的光子探测。类似的,基于这种机制,超导纳米线还可用于其他粒子的量子灵敏度探测。

本研究提出的栅极调控超导纳米线低温温度计,正是基于上述(准)粒子注入效应与栅极可调性的耦合机制。器件采用侧栅对超导纳米线的超导电性进行调控,通过施加栅极电压 V_g ,将(准)粒子的注入到纳米线导致超导相变,引起电压脉冲^[11],并根据脉冲计数率与温度的强非线性映射关系实

现高精度、快速的低温温度测量。与传统基于超导材料的测温方法相比, 通过静态栅极电压 V_g 设置即可实现测温范围的扩展与灵敏度的优化, 可实现 ms 级响应与亚 mK 级精度。同时, 与基于超流—温度关系其他低温测量方案^[7-8]相比, 本器件无需反复电流扫描或依赖大量统计数据, 实现了更为简化的测量流程, 并具备可调节的灵敏度和测量范围, 更适合片上快速测温与大规模集成应用, 具有较高的综合效能。器件结构与主流半导体、超导集成电路工艺兼容, 支持片上集成, 为超导、光量子计算芯片等的片上温度监测提供参考方案。实验显示栅极计数率在液氮附近温区变化超过 3 个数量级, 具有较高的响应速度与分辨率; 栅极功耗在 nW 量级以下, 且纳米线自身功耗极低, 器件整体功耗低于液氮温区的商用硅二极管功耗^[23]。这些特性使其在低温物理研究、量子芯片热管理等方面具有重要应用价值。更重要的是, 该方案揭示了栅极电场在超导非平衡态调控中的新机制, 为发展基于电场调控超导电性的新型传感器提供了理论框架与实验方案。

1 实验

1.1 器件制备

本研究采用 NbTiN 作为超导薄膜材料, 其具有较高的超导临界温度和优异的机械稳定性, 适用于超导纳米线器件的制备。NbTiN 薄膜通过直流磁控溅射技术沉积于高纯度硅衬底上, 沉积薄膜厚度为 8 nm。超导纳米线与栅极结构图案化采用电子束光刻与反应离子刻蚀技术。首先, 在 NbTiN 薄膜表面旋涂 ZEP520 电子束光刻胶, 通过电子束光刻完成 80 nm 线宽的纳米线及栅极图形曝光; 随后, 通过显影液邻二甲苯显影与异丙醇定影; 最后, 通过反应离子刻蚀技术使用 CF_4 等离子体刻蚀获得线宽 80 nm、长度 5 μm 的超导纳米线。电极等辅助结构图案化采用接触式紫外曝光技术与反应离子刻蚀得到。

1.2 器件测试

器件电学特性测试在闭循环 GM 制冷机中完成, 所用系统最低温度可达 2.5 K。测试系统包括

恒压源 SRS SIM928、低噪声放大器 Mini-circuits LNA650、四通道电压采集卡 NI-6215、光子计数器 SRS SR400 等。器件通过 GM 制冷机恒温器电学通道与电学测试盒接入测试电路。采用准恒流法进行 IV 特性测试, 通过恒压源对偏置电阻 R_b (阻值为 100 k Ω) 和纳米线施加扫描电压, 即对纳米线施加对应的扫描偏置电流, 同步记录偏置电阻 R_b 两端电压, 获得电流—电压 (IV) 曲线。采用光子计数器 SR400 对器件的暗计数率和栅极注入引起的计数率进行测试, 在固定温度和栅极电压下, 施加一定的偏置电流, 利用光子计数器统计一定时间内超导纳米线暗计数以及由栅极注入引发的脉冲计数。此外, 通过器件所在制冷平台上的加热电阻与温控仪实现温度控制, 以实现变温测试。实验中所使用的标定温度计为东方晨景 DT-67-BO 型硅二极管温度计, 其在 4.2 K 附近的短期稳定性约为 1 mK, 测量重复性优于 10 mK, 具有良好的精度与重复性。温控系统采用闭环 PID 控制模式, 在 2.5–7 K 范围内实测稳定度优于 ± 5 mK, 保证了温度基准的相对可靠性。

2 结果与讨论

2.1 器件结构与原理

本研究提出的栅极调控超导纳米线温度计, 基于超导纳米线在栅极电场调控下 (准) 粒子注入引起的计数率对温度的响应行为, 建立温度与脉冲计数率之间的映射关系, 实现低温温区的温度测量。图 1(a) 展示了该低温温度计的三维结构示意图, 核心敏感元件为一根基于 NbTiN 薄膜制备的超导纳米线, 其特征尺寸为 8 nm (厚) $\times$ 80 nm (宽) $\times$ 5 μm (长)。栅极由同一薄膜制备而来, 栅极宽度为 200 nm, 与超导纳米线的间隔为 60 nm, 如图 1(b) 所示, 该结构构成了电场调控单元, 允许通过施加栅极电压 V_g 调控纳米线的超导电流。尽管栅极电场调控超导微纳结构的物理机制仍存在争议, 但此前有关报道验证了 (准) 粒子注入在电场调控过程中的贡献。类似于 SNSPD 的对于探测光子注入超导纳米线的测试方法, (准) 粒子注入超导纳米线也将引起类似的脉冲信号。基于此, 可对栅极电场引起的注入超导纳米线的 (准) 粒子进行测量, 得到注

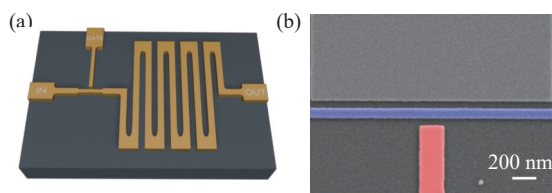


图1 器件结构: (a) 器件的三维结构示意图, 器件由栅极、超导纳米线与串联电感组成; (b) 器件栅极调控区域的伪色扫描电子显微镜图像, 图中标示出超导纳米线(蓝色)和栅极(红色), 右下角标尺长度为 200 nm

Fig. 1 Device structure: (a) Three-dimensional schematic of the device, consisting of a gate electrode, a superconducting nanowire, and a series inductor. (b) False-color scanning electron microscope (SEM) image of the gate-controlled region. The superconducting nanowire (blue) and gate electrode (red) are highlighted. The scale bar in the lower right corner represents 200 nm.

入速率的表征。进一步地, 温度对于注入纳米线的效率及纳米线的灵敏度具有一定的依赖关系, 据此, 形成栅控计数率于温度的映射关系, 可以实现温度的低温区测量。同时, 由于栅控电场调控作用的存在于超导薄膜材料超导转变温度以下的大部分区域, 使得该器件具有较大的理论测温范围。

图2展示了完整的实验系统与测试配置。实

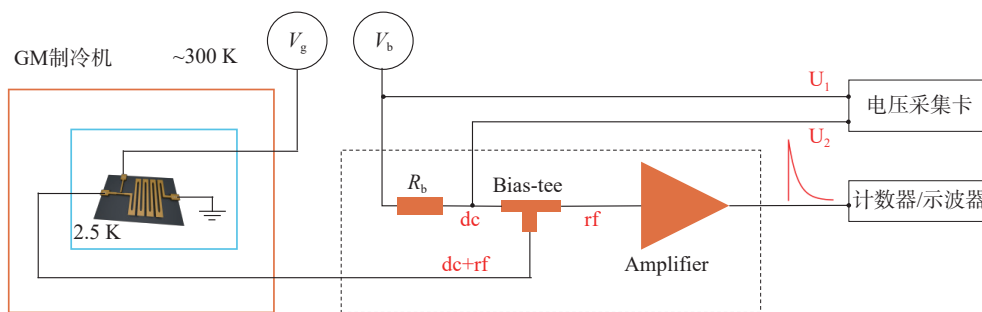


图2 基于闭循环 GM 制冷机(最低温度 2.5 K)的栅极调控超导纳米线温度计测试系统, 集成直流与射频读出

Fig. 2 Gate-controlled superconducting nanowire thermometer measurement system based on a closed-cycle GM cryocooler (base temperature 2.5 K), integrating both DC and RF readout

2.2 基本电输运特性

为验证所制备栅极调控超导纳米线器件在低温下的电输运特性, 本节围绕栅控超导纳米线器件的电流—电压特性、超导临界电流 I_c 的温度依赖性进行了系统测试与分析。

首先, 本研究对器件的电阻—温度曲线进行了测量, 采用如图2中所示电路, 对器件施加恒定的偏置电流, 通过电压采集卡 NI-6215 采集器件两端电压, 并通过温控仪同步记录温度。如图3(a)所示,

验系统基于闭循环 GM 低温制冷机(测试中所用系统最低温度 2.5 K), 配备高精度温控仪和 PID 控制加热模块实现稳定控温。在信号读出方面, 采用低噪声放大器与专用光子计数器来实现。具体而言, SRS SIM928 稳压源为偏置电路提供恒压驱动, 经由串联电阻形成准恒流源, 对超导纳米线提供恒定偏置电流 I_b 。纳米线两端信号经过低噪声放大器 Mini-Circuits LNA650 放大后, 输入至 SRS SR400 脉冲计数器, 实现脉冲信号的计数识别, 或通过高速示波器观察脉冲波形。

为了对栅控超导纳米线的脉冲计数率的温度依赖进行研究, 本研究系统地开展了基本物性、电输运特性等测量工作。在固定条件下, 设定栅极电压 V_g 多个取值(如 -4 V、-3 V、-2 V、-1 V、0 V、1 V、2 V、3 V、4 V), 分别在多个温度点采集脉冲计数率。在典型设定下, 多个温度下的栅控计数率曲线呈系统性位移, 表明栅控计数率与温度的非线性依赖关系, 从而验证了该器件进行温度测量的可行性。该温度计系统基于栅控超导纳米线设计, 其核心工作机制结合了非平衡态超导电输运与栅极调控物理, 提供了一种新型低温温度测量方案, 为片上温度感知系统开发提供了新的路径。

器件存在两端明显的超导转变, 分别为栅控超导纳米线的超导转变和串联电感的超导转变。可以得到, 超导纳米线的超导转变温度 $T_c \sim 8.1$ K, 正常态电阻 ~ 24 k Ω 。测试方法采用准恒流 IV 扫描, 即缓慢升高偏置电流直至纳米线发生超导—正常态相变, 以临界电流 I_c 的定义点为电压跃变首次发生处对应的电流值。由图3(b)可见, 随偏置电流增大, 器件呈现出显著的超导转变, 表明器件具有良好的超导电性。图3(c)为器件临界电流随温度的变化

曲线, 温区覆盖 2.5~7.5 K, 步进为 500 mK。结果显示, 器件临界电流 I_c 随温度升高单调下降, 呈现典型的超导纳米线电输运行为。值得注意的是, 在

7.5 K 温度下器件仍保持 μA 级的临界电流, 为后续开展更大温度区间的计数率依赖提供了可行的操作窗口。

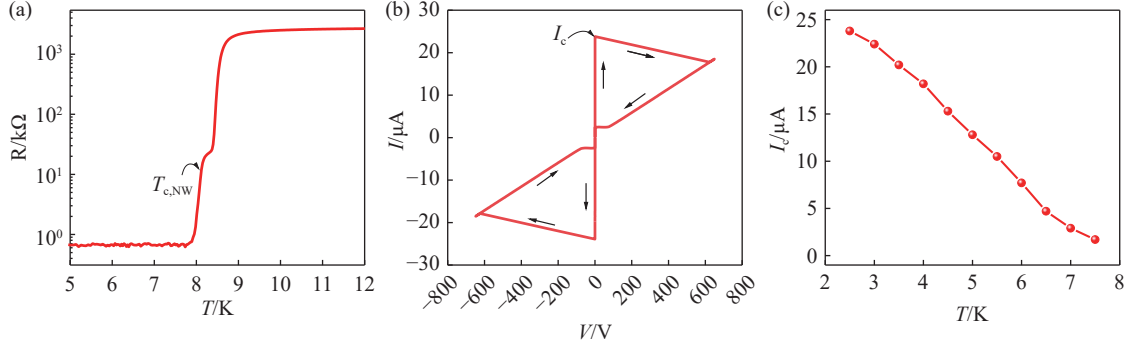


图 3 器件的电输运特性: (a) 5 K 至 12 K 的电阻-温度曲线; (b) 2.5 K 下的电流-电压特性; (c) 2.5 K 至 7.5 K 范围内超导临界电流(I_c)随温度的变化

Fig. 3 Electrical transport characteristics of the device: (a) Resistance-temperature curves from 5 K to 12 K; (b) Current-voltage characteristics at 2.5 K; (c) Temperature dependence of the superconducting critical current (I_c) from 2.5 K to 7.5 K

2.3 栅极电场调控特性

为探究栅极电场对超导纳米线器件电输运特性的调控能力, 本研究在多个温度点(2.5 K、3.5 K、4.2 K)下, 系统测量了器件临界电流 I_c 随栅极电压 V_g 的变化关系, 结果如图 4(a) 所示。测试中, 栅压扫描范围为 -6 V 至 $+6\text{ V}$, 所有温度下均观察到栅压对超导电性的抑制效应, 表明该器件具备良好的电场响应稳定性。具体而言, 当 $|V_g|$ 低于某一阈值时, 器件的临界电流几乎不受影响, 而当 $|V_g|$ 超过该阈值后, I_c 开始显著下降, 说明栅极电场已引发了纳米线的局域超导相变。此外, 栅极电压调控效应

在正负偏置下表现出一定程度的不对称性。在负栅压条件下, 响应阈值也略低于正栅压情形。这种不对称性可能源于场发射机制的非对称性、基底和刻蚀方法的影响等^[12-13]。同时, 本研究还表征了栅极漏电流 I_{leak} 随 V_g 的变化关系, 结果如图 4(b) 所示。在所有温度点(2.5 K、3.5 K、4.2 K)下, I_{leak} 的显著上升时对应的栅极电压 V_g 与 GCS 效应的出现基本吻合, 暗示该器件中栅极泄漏电流与 GCS 效应的相关性。而在该电压以下, 栅极泄漏电流变化较小, 大小在 1 nA 以下, 且随温度的变化不大。这一特性对于保证器件的低功耗、长期稳定运行

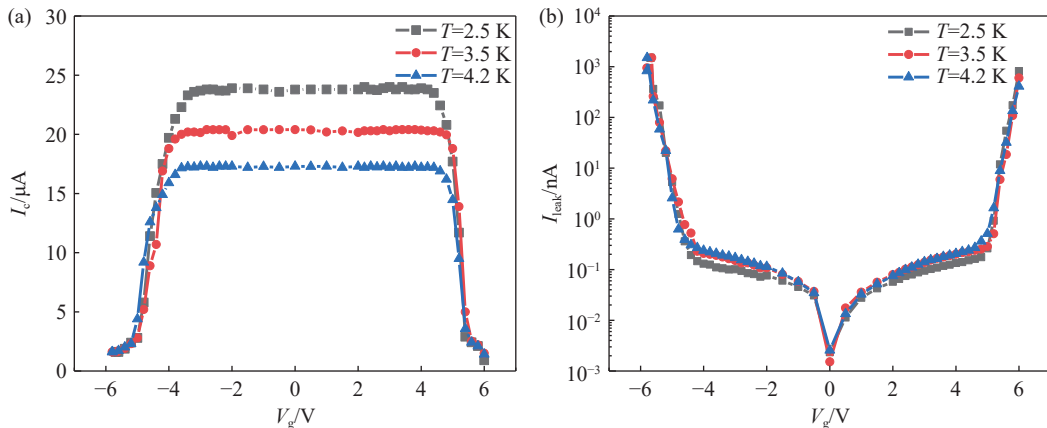


图 4 不同温度下器件的栅压调控特性。 (a) 临界电流随栅极电压的变化关系; (b) 栅漏电流随栅极电压的变化关系

Fig. 4 Gated electrical transport characteristics of the device at different temperatures. (a) Critical current as a function of gate voltage; (b) Gate leakage current as a function of gate voltage.

具有可用性具有重要意义。综上可见,栅极电压超过阈值时,漏电流急剧上升并伴随超导电流明显抑制,抑制程度与注入功率而非电场强度相关,同时对极性敏感,但与温度无显著相关性,这些特征难以用纯电场效应或焦耳热效应解释,更符合栅极泄漏电流或场发射电子注入导致的局域非平衡准粒子产生机制。此外,该器件显著的电场调控及较低的漏电流以及可重复性强的调控行为,为其后续在温度探测提供了良好的物理基础。

2.4 栅控计数率温度依赖

为探究超导纳米线在栅极电场下的计数率的温度依赖特性,本节重点研究其脉冲计数行为与温度之间的关联关系。

首先,在 $T=2.5\text{ K}$ 下对器件施加 $6\text{ }\mu\text{A}$ 的偏置电流与 4 V 的栅极电压,得到了器件因(准)粒子注入引起的计数率曲线,计数率的单位为 cps(counts per second)。如图 5(a) 所示,典型栅控纳米线在固定偏置电流、栅压下测得的脉冲响应波形,表现为

一个快速上升随后缓慢恢复的电压脉冲,且信号上升陡峭。该脉冲与 SNSPD 中单光子注入引发的响应类似,可能来源于电荷的注入或者粒子等的注入行为。为进一步探究在不同栅压下计数率的差异,本研究在 $T=2.5\text{ K}$ 下测量了多组栅压下计数率随偏置电流的变化。如图 5(b) 所示,在 $V_g=1\text{ V}$ 、 2 V 、 -1 V 时,计数率与 $V_g=0$ (即 SNSPD 中的暗计数) 时一致,在 $\sim 0.9I_c$ 时暗计数开始出现并呈指数增长,此时栅压并未对器件的 I_c 产生抑制(见图 4(a)); 在 $V_g=3\text{ V}$ 、 $V_g=-2\text{ V}$ 时,器件计数率在指数增长前存在增长区间,此后与暗计数基本一致,表明超导纳米线中开始存在注入效应,此时注入程度不足以改变其 I_c ; 在 $V_g=4\text{ V}$ 、 -3 V 、 -4 V 时,器件计数率在低偏置电流即出现显著计数,并随偏置电流快速增长,与器件 I_c 受栅压抑制吻合。由此可见,计数率随栅压增加而快速上升,表现出显著的阈值特征与极性差异,表明栅极作用通过高能电子、准粒子等能量注入,破坏局域超导态来实现临界电流的抑制。

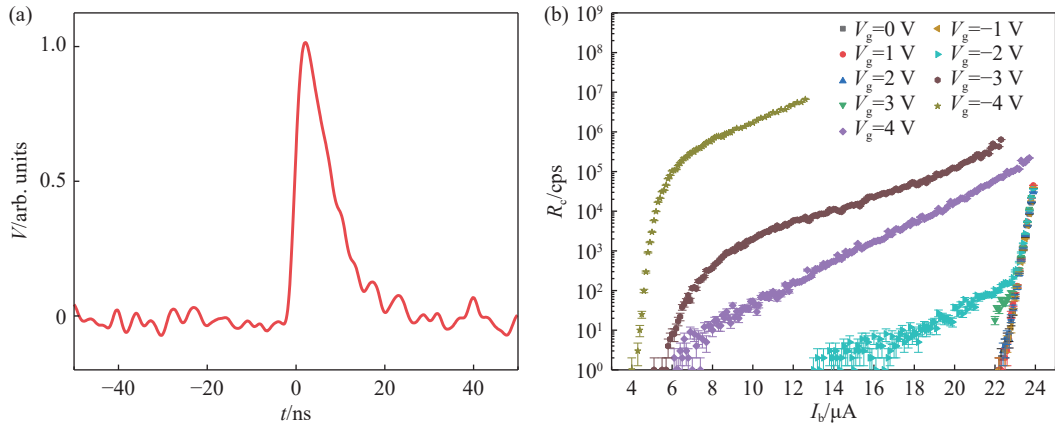


图 5 2.5 K 下器件的栅控计数率特性。(a) 在偏置电流 $6\text{ }\mu\text{A}$ 、栅极电压 4 V 条件下的计数脉冲波形;(b) 不同栅极电压下计数率随偏置电流的变化曲线

Fig. 5 Gated count rate characteristics of the device at 2.5 K. (a) Count pulse waveform under a bias current of $6\text{ }\mu\text{A}$ and gate voltage of 4 V ; (b) Count rate as a function of bias current under different gate voltages.

为了验证计数率能否反映了系统温度对该器件 GCS 效应中(准)粒子注入行为的调制能力,本研究在三个典型温度点(2.5 K 、 3.5 K 、 4.2 K)下对固定栅压时计数率随偏置电流的变化进行了表征。图 6(a)、(b)分别展示了不同栅极电压条件($V_g=-3\text{ V}$ 、 -4 V)下,在三个典型温度点(2.5 K 、 3.5 K 、 4.2 K)下器件栅控计数率在偏置电流 $5\sim 8\text{ }\mu\text{A}$ 范围内的变化情况。如图 6(a)所示,在 $V_g=-3\text{ V}$ 时,随

温度上升,栅控计数率呈增大趋势,栅控计数率曲线向低偏置电流方向移动。如图 6(b)所示,在 $V_g=-4\text{ V}$ 时也有相同现象。上述结果验证了固定栅压下栅控计数率与温度之间的相关性,为进一步构建温度—计数率映射关系提供了实验依据。此外,计数率随温度升高显著上升,表明该过程主要受热激发准粒子密度升高及其与电场注入准粒子的协同作用影响:随着温度升高,超导能隙减小、准粒子

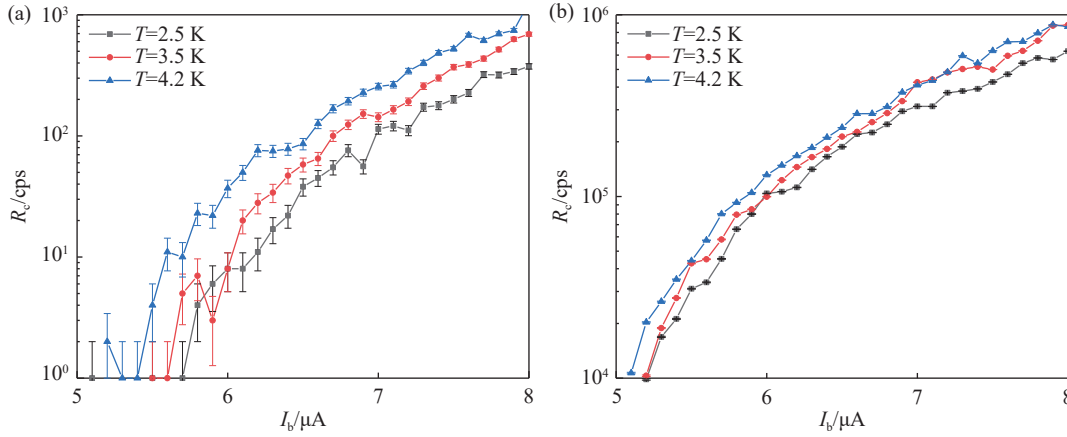


图 6 在固定栅压 V_g 时, 不同温度下计数率随偏置电流 I_b 的变化。(a) $V_g = -3$ V; (b) $V_g = -4$ V

Fig. 6 Count rate as a function of bias current I_b at different temperatures under fixed gate voltage V_g . (a) $V_g = -3$ V; (b) $V_g = -4$ V

浓度增加, 使局域超导态更易被触发进入非平衡, 从而计数率提高。该结果进一步支持了场发射或泄漏电流引发的非平衡准粒子注入机制。

2.5 温度测量性能

为评估所提出的栅控超导纳米线温度计的实用性能, 本节从动态范围、灵敏度、分辨率及稳定性等方面对器件的性能进行系统表征。

首先, 本研究在不同温度下对器件在固定偏置条件下的栅控计数率及暗计数率进行测量。为获得较大的响应温度范围、较低的栅极电压, 选择固定偏置条件为 $V_g = -3.5$ V、 $I_b = 6$ μ A, 此时栅极功耗 $P_G \sim 0.7$ nW。如图 7(a)所示, 红色点线为固定偏置条件下栅控计数率随温度的变化, 而蓝色点线为固定偏置电流下暗计数率随温度的变化; 计数率取样间隔为 1 s, 并采集 10 次求均值与标准差。数据显

示, 当温度从 2.5 K 升至 6.2 K 时, 栅控计数率均值由 1.46×10^3 cps 升至 3.97×10^5 cps, 覆盖 3 个数量级, 并呈现出显著的非线性响应, 同时在 $0.76 T_c$ 时仍保持显著响应。相比之下, 暗计数均值在 5.9 K 及以下始终为 0, 同时在 6.1 K、6.2 K 下均低于栅控计数率均值的 2.1% 且远小于对应的标准差 σ 。受限于系统最低温度限制, 未对 2.5 K 以下温区进行测量, 但在 2.5 K 时栅控计数率为 1.46×10^3 cps, 因而 2.5 K 以下仍可实现有效测量。此外, 通过调节栅压和偏置电流, 可对响应曲线进行调制, 向低温或高温对响应区间及进行扩展。可见, 在固定偏置下, 器件计数率具有较大的温度响应区间、较低的暗计数, 为实现基于 GCS 的大动态范围、低噪声的低温温度计提供了物理基础。

同时, 我们对器件的灵敏度进行了分析。器件的温度测量灵敏度 S 可以表示为:

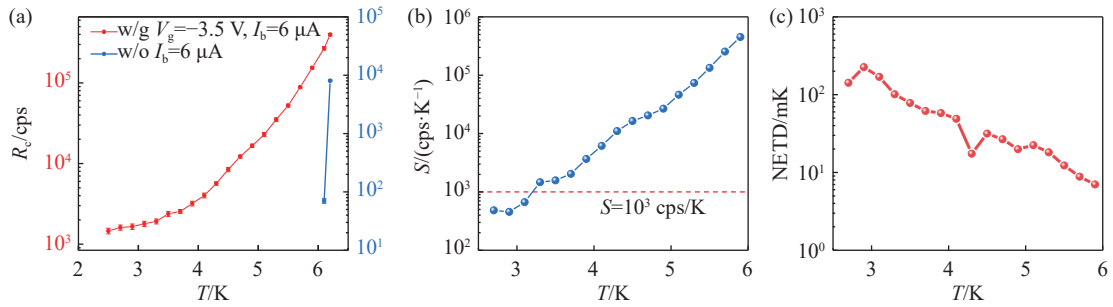


图 7 器件的性能表征: (a) 计数率随温度的变化 ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A), w/g 为施加栅极电压, w/o 为不施加栅极电压; (b) 灵敏度随温度的变化; (c) 噪声等效温差 NETD 随温度的变化

Fig. 7 Performance characterization of the device: (a) Count rate as a function of temperature ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A). "w/g" denotes with gate voltage applied, and "w/o" denotes without gate voltage; (b) Sensitivity as a function of temperature; (c) Noise equivalent temperature difference (NETD) as a function of temperature.

$$S = \frac{\Delta R_c}{\Delta T} \quad (1)$$

其中 ΔT 为温度变化, ΔR_c 为温度变化 ΔT 时对应的计数率变化。可见 ΔR_c 取值越大, 器件的灵敏度越高。如图 7(b) 所示, 在 2.7 K~5.9 K 温度区间内, 器件的灵敏度随温度上升而提高, 在更高温度下具有更高的灵敏度。图 7(b) 中红色虚线以上的灵敏度高于 10^3 cps/K, 数值上可满足 1 s 内 mK 级别温度响应。在 5.9 K 时取得最大灵敏度 4.51×10^5 cps/K, 数值上可满足 1 ms 内 10 mK 级的温度分辨, 而当灵敏度达到 10^6 cps/K 可以满足 mK 分辨率的 ms 级响应。然而, 实际环境中噪声的存在与统计涨落使得温度分辨能力有所下降, 为进一步评估器件在噪声环境下的温度分辨能力, 本研究参照光学时钟、惯性陀螺仪中广泛采用的频率时域分析方法, 引入 Allan 偏差 (Allan Deviation) 作为统计工具^[24-26], 定量分析器件在不同温度下的输出噪声特性及最小可检测温度。为了对其分辨率进行表征, 需要通过噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 进行量化。在本研究中, NETD 可按以下公式计算^[6,26]:

$$NETD = \frac{\Delta T}{\Delta R_c / \delta} \quad (2)$$

其中, δ 为温度 T 时计数率的 Allan 偏差。本研究对 2.5 K~5.1 K 温区内的离散温度点的 NETD 进行了分析计算。图 7(c) 展示了在积分时间 $\tau = 1$ s 的条件下, NETD 随温度的变化曲线。可见, 随温度升高, NETD 有逐渐减小的趋势, 在 $T = 5.9$ K 时, 取得最小值~7 mK, 在实际噪声环境下实现了 mK 级别的温度分辨能力。考虑所用低温系统的稳定性, 器件实际的分辨能力可能更高。此外, 可通过增大栅极注入、减小纳米线线宽、纳米线并联等方法增大器件的计数率、提高器件灵敏度, 并合理权衡灵敏度与栅极功耗实现最优性能。

为进一步研究器件工作的长期稳定性, 本研究在不同温度下对其栅控计数率的波动进行了测量。图 8 展示了在 $T = 3.9$ K、4.9 K、5.9 K 时连续 500 s 内的计数率统计情况, 实验中固定栅极电压 $V_g = -3.5$ V, 偏置电流 $I_b = 6$ μ A。结果显示, 在三个温度下计数率均保持稳定, 3.9 K、4.9 K、5.9 K 下的计数率波动的标准差分别为 2.25×10^2 cps、 1.27×10^3 cps、 7.73×10^3 cps, 均小于对应均值的 7%。从系统的温

度控制及读出方式来看, 计数率波动的误差可能主要来源于温度控制系统的热漂移、读出电路噪声等。总的来说, 该器件在不同温度下均展现出可接受的长期稳定性, 具备在低温物理实验与量子系统测量中的实用潜力。

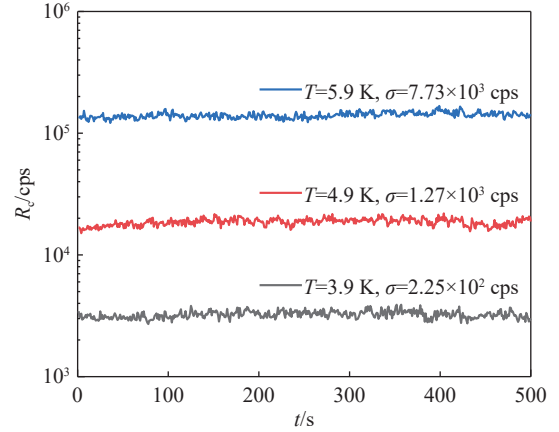


图 8 在 $T = 3.9$ K、4.9 K、5.9 K 时, 500 s 内器件在固定栅压与偏置电流下的计数率变化 ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A)

Fig. 8 Count rate fluctuations over 500 s at fixed gate voltage and bias current under $T = 3.9$, 4.9, and 5.9 K ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A)

为进一步对器件的噪声来源进行研究, 本研究分析了 Allan 偏差随积分时间 τ 的变化, 如图 9 所示。在 $T = 3.9$ K 时, 随积分时间 τ 增加, 直至 $\tau = 39$ s 到达极小值, 此后短暂上升后继续下降, 最小 NETD 为 12.5 mK; 经拟合得到两段下降斜率~-0.2, 说明计数率的噪声特性并非简单的白噪声 (白噪声在对数坐标下应呈-0.5 的斜率), 而是受到了系统温度漂移和低频噪声的影响。在 $T = 4.9$ K 时, 随积分时间 τ 增加, Allan 偏差短暂下降后呈现波动下降的趋势, 下降斜率~-0.2, 受到系统温度漂移和低频噪声的影响, 最小 NETD 为 11.9 mK。在 $T = 5.9$ K 时, 随积分时间 τ 增加, Allan 偏差单调下降后出现明显回升, 表现出更强的系统漂移影响; 在 $\tau = 31$ s 处取得极小值, 此时最小 NETD 为 5.5 mK。结合温控系统来看, 温控系统的温度波动和低频漂移会在积分过程中引入的计数率波动, 限制了器件的精度与 Allan 偏差在短时积分区间内的表现, 进一步提高温控系统稳定性将有助于提升器件的精度与稳定性。整体来看, 实验中观测到的温度漂移与低频噪声主要来自制冷系统与测量电子学的长期稳定性限制, 而非器件性能瓶颈。通过改进温控系统

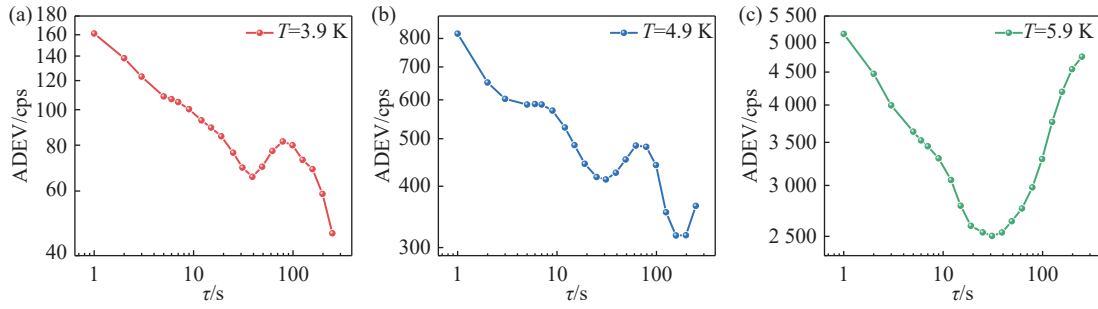


图9 不同温度下 Allan 偏差随积分时间 τ 的变化 ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A) (a) $T = 3.9$ K (b) $T = 4.9$ K (c) $T = 5.9$ K

Fig. 9 Allan deviation as a function of integration time (τ) at different temperatures ($V_g = -3.5$ V, $I_b = 6$ μ A): (a) $T = 3.9$ K, (b) $T = 4.9$ K, (c) $T = 5.9$ K.

稳定度与信号读出电路,可在更短积分时间内获得相同精度,提升短时测量稳定性与综合测温性能。

此外,由于当前所用 GM 制冷机最低温度为 2.5 K,本文测量范围受限。但根据实验结果,可通过增强栅极电压与偏置电流可提高计数率,在低温下实现 10^6 cps/K 以上的灵敏度。我们推测在稀释制冷机条件下 (<1 K) 数百 mK 区间内,该器或可实现亚 mK 级的精度与 ms 级响应。未来工作将基于稀释制冷机系统进一步验证其在亚开尔文温区的灵敏度和稳定性,并拓展至量子芯片片上测温应用。

3 结论

本研究提出并实现了一种基于栅极调控超导纳米线的低温温度计,通过栅极静态电场注入效应引发的局域超导—正常态相变,利用温度与相变脉冲计数率之间的非线性映射关系,突破了传统低温温度计在体积、响应速度、可调控性与集成性等方面的限制,且通过栅压的调节可获得宽温区覆盖与分辨率优化。实际噪声环境下,器件在液氦温区附近 (2.5 K–6.2 K) 均可稳定工作,并表现出低至 5.5 mK 的噪声等效温差与低于 1 nW 的功耗。同时,实验结果验证了泄漏电流或场激发引发的非平衡准粒子注入机制。此外,可通过系统及电路优化实现性能的提升,具备显著应用潜力,进一步的工作需要对器件的极低温响应与功耗、可重复性、磁场稳定性、计数率提升等方面进行研究。该工作不仅为低温温度测量、量子芯片片上热管理等提供了可扩展的解决方案,也为发展基于电场调控的新型超导量子传感器开辟了新路径。

参考文献:

- [1] 林熙. 低温实验导论 (上) [M]. 北京: 北京大学出版社, 2025.
- [2] WHEELER J, VISSERS M R, MALNOU M, et al. Sub-kelvin thermometer for on-chip measurements of microwave devices utilizing two-level systems in superconducting microresonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(19): 192601.
- [3] Lake Shore Cryotronics, Inc. Cryogenic temperature sensors [EB/OL]. [2025-06-23]. <https://www.lakeshore.com/products/categories/temperature-products/cryogenic-temperature-sensors>.
- [4] 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.
- [5] 尤立星. 光量子信息利器: 超导纳米线单光子探测器 [J]. *物理*, 2021, 50(10): 678-683.
- [6] 周飞, 陈奇, 刘浩, 等. 基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化 [J]. *物理学报*, 2024, 73(6): 340-347.
- [7] ALLMARAS J P, KOZOREZOV A G, BEYER A D, et al. Thin-film thermal conductivity measurements using superconducting nanowires [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2018, 193: 380-386.
- [8] ZGIRSKI M, FOLTYN M, SAVIN A, et al. Heat hunting in a freezer: direct measurement of quasiparticle diffusion in superconducting nanowire [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044024.
- [9] DE SIMONI G, PAOLUCCI F, SOLINAS P, et al. Metallic supercurrent field-effect transistor [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(9): 802-805.
- [10] RITTER M F, FUHRER A, HAXELL D Z, et al. A superconducting switch actuated by injection of high-energy electrons [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1266.
- [11] LI H C, ZHANG L B, TAN J R, et al. An incoherent

- superconducting nanowire phonon detector revealing the controversial gate-controlled supercurrent[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(23): 232601.
- [12] RUF L, ELALAILY T, PUGLIA C, et al. Effects of fabrication routes and material parameters on the control of superconducting currents by gate voltage[J]. *APL Materials*, 2023, 11(9): 091113.
- [13] RUF L, PUGLIA C, ELALAILY T, et al. Gate control of superconducting current: Mechanisms, parameters, and technological potential[J]. *Applied Physics Reviews*, 2024, 11(4): 041314.
- [14] ELALAILY T, KÜRTÖSSY O, SCHERÜBL Z, et al. Gate-controlled supercurrent in epitaxial Al/InAs nanowires[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(22): 9684-9690.
- [15] YU S, CHEN L, PAN Y, et al. Gate-tunable critical current of the three-dimensional niobium nanobridge Josephson junction[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(17): 8043-8049.
- [16] DU H, XU Z, WEI Z, et al. High-energy electron local injection in top-gated metallic superconductor switch[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2023, 36(9): 095005.
- [17] ALEGRIA L D, BØTTCHER C G L, SAYDJARI A K, et al. High-energy quasiparticle injection into mesoscopic superconductors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(4): 404-408.
- [18] RUF L, SCHEER E, DI BERNARDO A. High-performance gate-controlled superconducting switches: large output voltage and reproducibility[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(31): 20600-20610.
- [19] HUAN Q, MA R, ZHANG X, et al. Impact of on-chip gate voltage on the electric properties of NbTiN superconducting nanowire transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(13): 132601.
- [20] ROCCI M, SURI D, KAMRA A, et al. Large enhancement of critical current in superconducting devices by gate voltage[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(1): 216-221.
- [21] RITTER M F, CRESCINI N, HAXELL D Z, et al. Out-of-equilibrium phonons in gated superconducting switches[J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(2): 71-77.
- [22] ELALAILY T, BERKE M, KEDVES M, et al. Signatures of gate-driven out-of-equilibrium superconductivity in Ta/InAs nanowires[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(6): 5528-5535.
- [23] Lake Shore Cryotronics, Inc. DT-670 silicon diodes[EB/OL]. [2025-06-23]. <https://www.lakeshore.com/products/categories/overview/temperature-products/cryogenic-temperature-sensors/dt-670-silicon-diodes>.
- [24] ALLAN D W. Statistics of atomic frequency standards[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(2): 221-230.
- [25] 李雨薇. 精密时频信号产生与性能评估方法研究 [D]. 西安: 中国科学院大学 (中国科学院国家授时中心), 2019.
- [26] CHEN Q, ZHOU F, WEI C, et al. Sub-millikelvin-resolved superconducting nanowire single-photon detector operates with sub-pW infrared radiation power[J]. *National Science Review*, 2025, 12(1): nwae319.