

基于运算放大器的超导纳米线单光子探测器 低温直流耦合读出电路*

陈志刚¹⁾²⁾ 张伟君^{1)2)†} 张兴雨¹⁾ 王钰泽¹⁾ 熊佳敏¹⁾
洪逸裕¹⁾²⁾ 原蒲升¹⁾ 吴玲¹⁾ 王镇¹⁾²⁾ 尤立星¹⁾²⁾

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海市超导集成电路技术重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

(2024年3月19日收到; 2024年5月10日收到修改稿)

超导纳米线单光子探测器 (SNSPD) 具有高计数率、高探测效率和低暗计数等优点, 在光量子通信、光量子计算、激光测距与成像等领域发挥着重要作用. SNSPD 的最大计数率 (探测速度) 会受前级读出电路的影响, 为了提升最大计数率, 通常需要使用一个宽带宽的低温直流耦合读出电路. 本文报道了基于商用高速运算放大芯片 OPA855 搭建的 SNSPD 低温直流耦合放大读出电路, 系统表征了该电路从室温 300 K 到低温 4.2 K 下的性能参数. 通过提升 OPA855 的工作电压, 解决了电路在低温下带宽损失的问题. 进一步, 将 OPA855 放大电路安装在 40 K 温区, 使用其实现了 SNSPD 探测性能的实验评估. 相对于常规室温交流耦合电路, SNSPD 的最大计数率约提升了 1.3 倍. 本研究可为 OPA855 芯片在高速 SNSPD 等低温领域提供相关参考信息.

关键词: 运算放大器, 低温读出电路, 直流耦合, 超导纳米线单光子探测器

PACS: 85.25.-j, 85.60.Gz, 07.20.Mc, 84.30.Le

DOI: 10.7498/aps.73.20240398

1 引言

超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single-photon detector, SNSPD) 是一种高速、高效率的新型单光子探测器, 它广泛应用于光量子通信^[1]、光量子计算^[2]、激光测距与成像^[3-5]、红外探测^[6]等领域. SNSPD 的工作原理是利用其热点 (hotspot) 效应^[7], 即当一个光子入射到纳米线上时, 会导致纳米线的局部失超, 形成热点 (电阻态), 进而使得流经器件的电流被排出到读出电路上形成一个快速的电脉冲, 表明探测到了一个光子. 接着, 纳米线的热点通过衬底散

热恢复到超导状态. 迄今, SNSPD 在通讯波长 1550 nm 下实现了 90% 以上的效率^[8,9], 小于 20 ps 级的时间分辨率^[10], 最大计数率 (探测速度) 超过 1.5 GHz^[11]. 然而, 由于各个指标之间相互制约, 这些指标还没有在同一个 SNSPD 中实现. 这是因为 SNSPD 的性能参数不仅受限制于 SNSPD 本身的电-热弛豫特性, 也受到外部读出电路性能的影响. 比如, 目前研究中大都采用室温交流耦合读出方案^[11-13], 但是交流耦合读出放大器的前端电容在 SNSPD 高速探测时, 会向器件端放电导致器件提前闩锁, 使得 SNSPD 的最大计数率远低于理论预期. 为了解决这一问题, Kerman 等^[14]提出了低温直流耦合放大电路方案^[14], 通过使用 GaAs

* 量子科技创新 2030 重大项目 (批准号: 2023ZD0300100)、国家自然科学基金 (批准号: 62371443, 61971409)、上海市科委科技基金 (批准号: 18511110202, 2019SHZDZX01)、上海市青年科技英才扬帆计划 (批准号: 21YF1455500) 和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangweijun@mail.sim.ac.cn

HEMTs (型号: Fujitsu FHX45X) 作为前级低温放大器, 实现了 SNSPD 最大计数率的改善. 当然, 也可以通过直流支路分流的形式 (比如将室温下的电容^[15] 或电感^[16] 接地等) 来减弱电容放电效应的影响, 不过这些方式会导致输出脉冲幅值降低、时间抖动增大等问题.

低温放大器^[17] 利用低温工作环境能有效抑制温度涨落噪声, 进而显著提升微弱信号的信噪比, 在天文观测^[18,19]、量子计算^[20]、基础科学研究^[21] 等领域具有重要的用途. 低温放大器的类型, 主要可分为射频放大器和运算放大器. 对于放大器的选型, 本设计主要考虑放大器的信号耦合架构、工作频率范围以及低温工作可能性等因素. 目前主流的射频放大器, 由于需要在信号输入端加入隔直电容, 不能满足直流耦合的需求. 为此, 本研究选择具有直流耦合架构的、商用的高速运算放大器 (operational amplifier, OPA) 进行电路设计.

通常 OPA 具有很高的压摆率^[22], 结构简单易于设计, 这种类型的芯片在 SiPM 器件^[23]、光电探测器^[24,25] 等领域得到了广泛的使用. 由于 SNSPD 的输出脉冲上升沿时间非常快 (~ 700 ps), 下降沿是由热点的自恢复决定时间速度慢 (~ 10 ns), 因此, 对外部读出电路的带宽需求要求很高 (大于 1 GHz). 比如, 2019 年, Cahall^[26] 将低功耗的运算放大器 LMH6629 应用于 SNSPD 的低温直流耦合读出, 然而由于 LMH6629 在低温下的带宽丢失比较严重, 使得 SNSPD 的脉冲上升沿仅为 3.5 ns, 限制了该电路方案的使用范围. 为此, 本研究根据 SNSPD 的带宽需求, 选用德州仪器公司 (Texas Instruments Inc.) 的高速运算放大器 OPA855 芯片^[27], 因为它在现有产品中具有最大的增益带宽积 (gain bandwidth product, GBW), 增益带宽积为 8 GHz 覆盖从直流到 GHz 范围的频率; 适中的噪声系数 (0.98 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @室温); 脉冲上升时间很快 (仅为 0.17 ns), 能满足 SNSPD 高速应用需求. 而且 OPA855 放大器采用 SiGe BiCMOS 工艺制造, 这种材料构成的芯片通常可以在低温下工作. 为此, 许多研究者对 OPA855 芯片在低温环境下的工作

性能和应用前景产生了浓厚兴趣, 然而目前相关报道比较少.

本文基于运算放大器 OPA855 芯片, 采用正向输入负反馈的结构、直流耦合的方式设计放大电路, 首先表征了 OPA855 放大电路在低温下的性能参数, 然后将其作为 SNSPD 读出电路. 本研究通过提升工作电压 (由 ± 2.5 V 提升至 ± 4.9 V) 有效解决了 OPA855 放大电路在低温环境下的带宽损失问题, 满足了 SNSPD 带宽覆盖 DC 到 GHz 的需求. 最终, 实现了在 40 K 温区下, ± 4.9 V 供电电压时, 读出电路电流为 8 mA, 功耗为 78 mW, 电路增益为 16.7 dB, -3 dB 带宽为 2.7 GHz. 进一步利用 OPA855 放大电路和 SNSPD 级联, 相对于常规室温读出电路, 最大计数率大约提升了 1.3 倍. 本研究的 OPA855 运算放大器及其读出方法, 有望为高速 SNSPD 应用、天文观测、量子计算等低温领域提供新的解决方案.

2 电路设计和仿真

OPA855 芯片是一款基于 SiGe BiCMOS 工艺制造的高性能运算放大器^[27], 具有低输入偏置电流、高共模抑制比、高增益带宽积等特点, 表 1 列出了详细的芯片参数. 本文中, “带宽”通常指 -3 dB 带宽, 即当放大器的增益降至原始增益的 0.707 倍 (-3 dB) 时对应的频率范围.

为了适应 SNSPD 输出脉冲中包含的大量频率分量 (>1 GHz), 以更真实地还原其脉冲信号, 需要设计 OPA855 放大电路的带宽至 1 GHz 以上. 而 OPA855 放大器稳定工作的增益要求大于等于 7 V/V, 此时在室温下放大器带宽大于 1 GHz, 能够满足 SNSPD 的要求. 当然, 如果针对高增益应用情形, 可选用 39 V/V 的增益, 但相应的带宽约降低至 200 MHz.

Kerman 等^[28] 研究发现, SNSPD 的最大计数率不仅会受外部负载阻抗 R_L 的影响, 最大计数率正比于 L_K/R_L , 其中 L_K 为 SNSPD 的动态电感, 也会受到电路耦合的方式影响^[14]. 本研究采用了

表 1 OPA855 芯片主要参数
Table 1. Main performance parameters of an OPA855 chip.

增益带宽积 GBW/GHz	最低稳定增益 $A_v/V/V$	开环增益 α/dB	差模输入阻抗 $r_d/k\Omega$	共模输入阻抗 $r_c/M\Omega$	闭环输出阻抗 r_o/Ω	静态电流 I_{qu}/mA
8	~ 7	76	5	2.3	0.15	17.8

同向输入负反馈放大的直流耦合设计, 电路结构如图 1(a) 所示. 其中, R_1 和 R_2 电阻共同构成反馈回路. 放大器的增益 (A) 由 $A \cong \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{1 + 1/T}$ 决定^[29], 其中环路增益为 $T = \alpha\beta$, 而 α 为开环增益, 反馈系数 $\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$. 由于 OPA855 的最大开环增益为 76 dB, 所以 $A \cong 1 + R_1/R_2$, 根据 OPA855 芯片 7 V/V 的最低增益、带宽配和阻抗匹的要求, 本设计选取 $R_1 = 453 \Omega$, $R_2 = 75 \Omega$ 这一反馈电阻组合.

OPA855 的共模输入阻抗为 2.3 M Ω , 为了配合传统测试系统的 50 Ω 标准阻抗要求, 将放大器输入电阻 R_4 设计为 50 Ω . R_3 为第一级电路的负载电阻, 通过后级终端的阻抗需求确定, 选择为 200 Ω . 为了使得运放信号的参考电位为 0 电平, 采取正负电压 ($V_{\pm s}$) 的供电方式, 在电压源端口加入电感和旁路电容, 电感 (L_1, L_2) 和电容元件 (C_1 — C_5) 主要用于电源纹波的滤除. 电阻、电感和电容元件使用的具体参数见表 2.

针对低温应用, 本研究筛选了对温度变化不敏

感的薄膜金属电阻和电容元件 (C0 G/NP0 材质); 电感使用绕线电感. 表 2 列出了电路外部元件在常温和低温下的具体值、型号和品牌, 以及变化率. 测量结果表明, 所选用的电路元件在低温和室温下的数值差异基本保持在 2% 以下, 表现出较低的温度敏感性.

本研究使用 Altium designer 软件进行 PCB 设计, 选用介电常数为 4.3 的 FR4 材料作为 PCB 基板, 并采用 4 层 PCB 层叠结构设计; 相较于 2 层板, 该设计能将信号层和电源层分开, 以保证信号完整性, 有效减少电路噪声和寄生串扰. 由于输出和反向输入引脚对寄生电容比较敏感, 本设计将输出引脚、反向输入引脚和反馈电阻三者所在的地平面挖空, 并缩短输出到输入的反馈路径. 最后, 使用不同容值的电容组合对电源噪声进行滤波, 将较小容值的电容靠近芯片引脚位置摆放. 使用低阻抗的贴片电阻, 并对信号线的周围进行了覆铜和加入过孔处理. 通过用地层包围信号走线的方式, 降低信号干扰. 图 1(b) 显示了完成元件焊接后的 PCB 电路的实物照片.

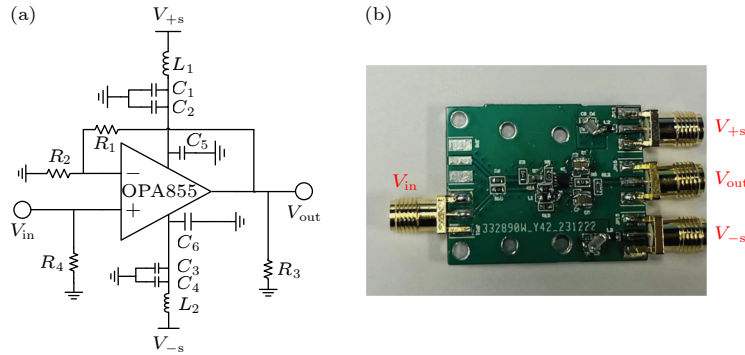


图 1 (a) 基于 OPA855 芯片的放大电路原理图; (b) 电路板的实物照片, V_{in} 为信号输入端口, V_{out} 为信号输出端口, V_{+s} 是正电压供电端口, V_{-s} 是负电压供电端口

Fig. 1. (a) Schematic diagram of an amplification circuit based on the OPA855 chip; (b) photo of the circuit board, where V_{in} is the signal input port, V_{out} is the signal output port, V_{+s} is the positive voltage power supply port, and V_{-s} is the negative voltage power supply port.

表 2 使用的外部电子元件参数及其在不同温度下的性能

Table 2. Parameters of external electronic components used and their performance at room and low temperatures.

元件类型/单位	符号	室温(300 K)测量值	低温(2.2 K)测量值	变化率/%	型号	品牌
电容/nf	C_1, C_2, C_3, C_4	100	102	2.0	C0 G 1206	村田
	C_5, C_6	10	10	~0	C0 G 0603	
薄膜电阻/ Ω	R_1	453	455	0.4	0603	松下
	R_2	75	76	1.3		
	R_3	200	203	1.5		
	R_4	50	51	2.0		
磁珠	L_1, L_2	—	—	—	0603	村田
OPA855	—	—	—	—	WS0N8	德州仪器

图 2(a) 展示了 Tina 软件仿真与室温下实验测量结果的对比. 在低频部分, 两者的幅频特性曲线能较好地吻合, 仿真结果增益为 16.7 dB, 带宽范围 DC—2.8 GHz; 测量值为 16.7 dB, 带宽范围 10 kHz—2.1 GHz, 其中, 低频带宽受限于测量仪器的最小量程. 在高频部分, 实验与仿真存在一些偏差, 这是因为当前使用的基板电路仍然存在较大的寄生参数, 例如寄生电容、寄生电感等, 增加了电路的高频损耗. 未来通过进一步的优化设计, 可以改善这部分的性能.

为检验 PCB 设计和电路测试的可靠性, 将本次 OPA855 放大电路设计与德州仪器的评估板 (产品型号 OPA855 IDSGEVM, 采用 4 层 PCB 设计)^[30] 在室温下进行了对比测量, 其传输特性曲线如图 2(b) 所示. 可以看到, 本设计与厂家的评估板, 趋势上相符, -3 dB 带宽与评估板相差 0.3 GHz,

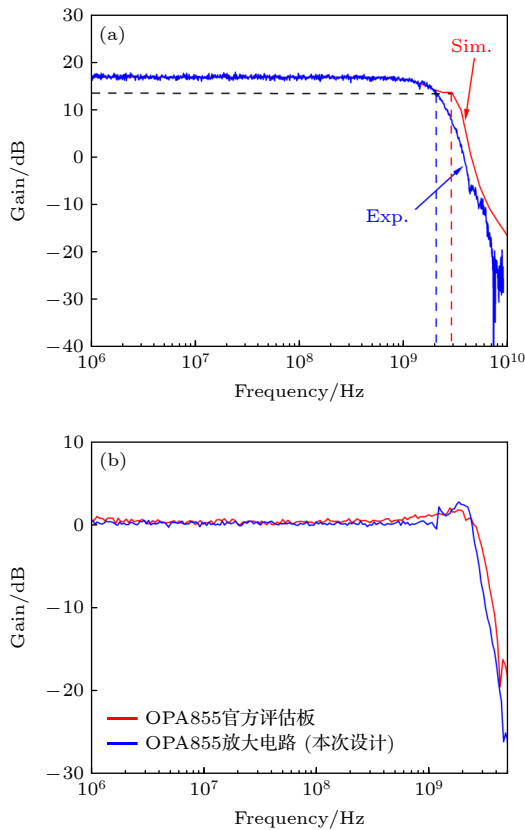


图 2 (a) 仿真 (Sim.) 和室温测试 (Exp.) 的增益-频率关系的对比图; (b) 室温下 OPA855 评估板 (德州仪器) 与本设计的测量结果对比

Fig. 2. Comparison of the gain-frequency relationship between simulation (Sim.) and room temperature experiment (Exp.); (b) comparison of measurement results between OPA855 evaluation board (Texas Instruments) and this design at room temperature.

基本符合预期设计要求. 不过, 也注意到在 1.8 GHz 的频率位置确实会存在较强的增益尖峰, 这可以通过优化 PCB 设计来进一步改善.

本研究使用 LT-Spice 仿真软件^[31] 来评估 SNSPD 等效电路与 OPA855 放大电路级联的效果. 图 3(a) 显示了仿真的电路图, 它主要包含 3 个模块: OPA855 供电电源、SNSPD 等效电路、OPA855 放大电路, 如图中虚线框所示.

在仿真中, 本次设计将 SNSPD 的转变电流设置为 $16 \mu\text{A}$. 由于直流耦合方式中的直流偏移效应, 需要将 SNSPD 的偏置电压设置为 2.0 V, 此时偏置电压源 (经过一个 $100 \text{ k}\Omega$ 的串联电阻) 为 SNSPD 提供偏置电流. SNSPD 的输出信号 (Out1) 经过传输线 (T2) 输入到 OPA855 放大电路, 实现信号放大 (对应于 Out2), 图 3(b) 展示了经 OPA855 放大器前后的脉冲波形对比, 可以看到放大前信号幅度约为 0.27 mV, 放大后峰峰值提升至 ~ 1.9 mV, 其峰峰值提升大约 7 倍, 符合放大器的增益设计. 由于采用直流耦合设计, 可以看到 OPA855 放大后的输出脉冲信号中叠加了一个直流电平偏移, 不过该脉冲信号的直流偏移可以通过二级放大电路来滤除, 比如 LNA2000 中的内置隔直电容. 由于二级放大电路不与 SNSPD 直接相连, 这部分的电容不影响 SNSPD 性能.

3 低温实验测量和分析

为了准确测量 OPA855 放大电路在低温下的功耗、增益和带宽等特性, 需要排除制冷机中低温同轴线的损耗和寄生参数的干扰, 即对待测信号进行可靠的校准. 为此, 本研究设计了基于 SOLT (short-open-load-through) 方法^[32] 的校准件, 信号传输线的阻抗通过 SI9000 软件设计成 50Ω .

图 4(a) 展示了整个校准件的设计 3D 视图, 其中 S 为短路端口, O 为开路端口, L 为负载端口采用两个 100Ω 的电阻并联形成 50Ω 负载, T 为直通端口. 图 4(b) 显示了校准件安装在 2 K 冷台后的实物照片. 整个校准件大小为 $3.1 \text{ cm} \times 5.7 \text{ cm}$, 通过螺丝固定在 G-M 制冷机的 2 K 冷台上, 以实现良好的热接触. 信号传输接口通过 SMA 连接线与低温制冷机同轴线连接. 图 4(c) 为测量设备与低温恒温器的连接示意图. 测试中, 使用精密数字源表 (E36311A, Keysight) 进行供电, 并将校准信

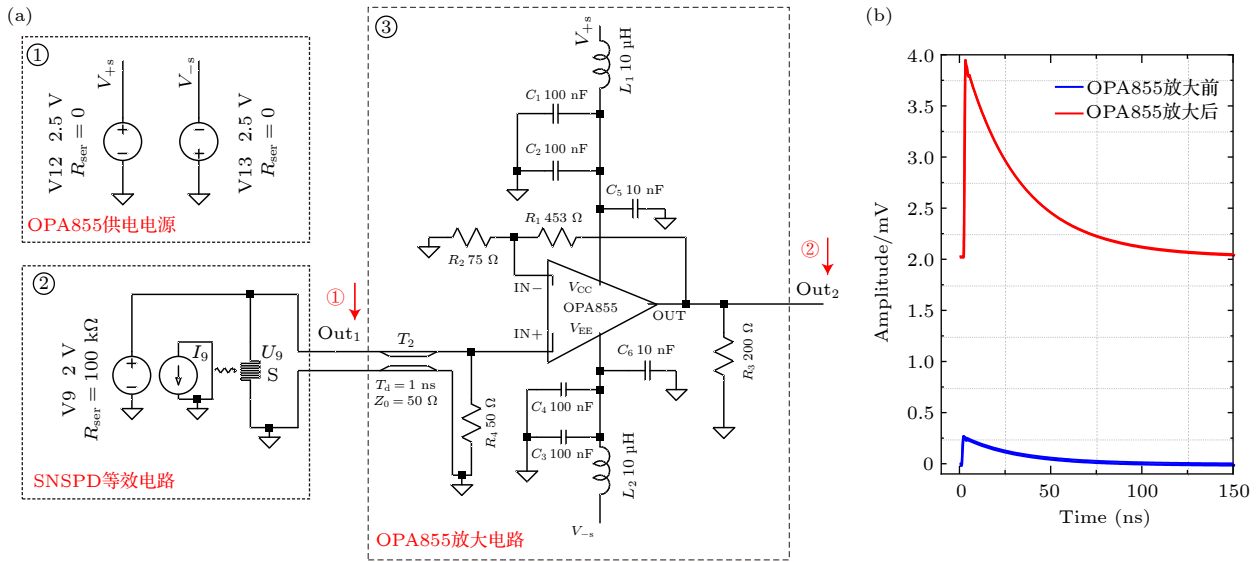


图 3 (a) SNSPD 等效电路与 OPA855 读出电路级联的仿真电路图；其中虚线框 1 中为 OPA855 供电电源模块，虚线框 2 中为 SNSPD 的等效电路模块，其中“U9”表示 SNSPD 的等效元件；虚线框 3 中为 OPA855 读出电路模块；(b) SNSPD 输出脉冲进入 OPA855 放大器前/后的仿真结果对比，其中“放大前”、“放大后”的脉冲信号监测位置分别由图 (a) 中的箭头 1, 2 指示 (Out1, Out2)

Fig. 3. (a) Simulation circuit diagram of the SNSPD equivalent circuit connected with the OPA855 readout circuit; the dotted box 1 is the power module that supplies the OPA855, and the dotted box 2 is the SNSPD equivalent circuit module, where “U9” represents the SNSPD equivalent component, the dotted box 3 shows the OPA855 readout circuit module; (b) comparison of simulation results before and after the SNSPD output pulse enters the OPA855 amplifier, the pulse signal monitoring positions of “before amplification” and “after amplification” are shown by arrows 1 and 2 (marked Out1 and Out2) in panel (a).

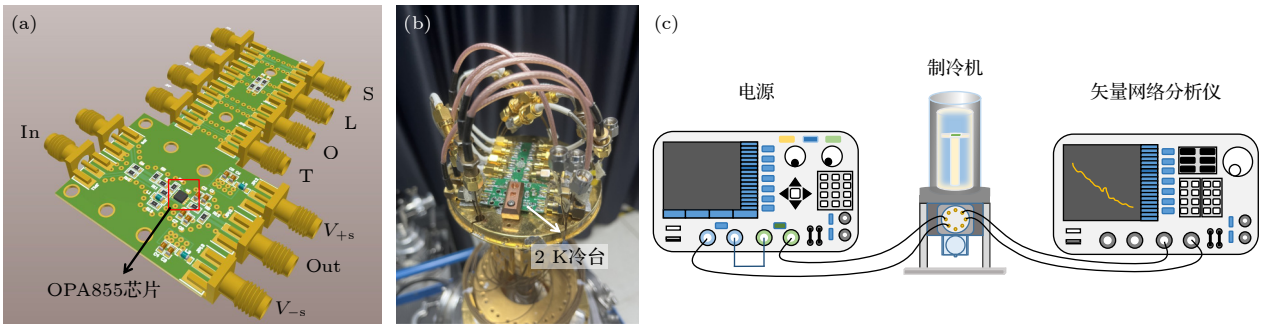


图 4 (a) SOLT 校准件 3D 示意图，其中 S 表示短路端口，O 表示开路端口，L 表示负载端口，T 表示直通端口，In 为信号输入端口，OUT 为信号输出端口， V_{+s} 为正供电电压， V_{-s} 为负供电电压；(b) 校准件安装在 2 K 冷台的照片；(c) SOLT 校准实验的设备连接示意图

Fig. 4. (a) 3D schematic diagram of the SOLT calibration component, where S represents the short-circuit port, O represents the open-circuit port, L represents the load port, T represents the straight-through port, In is the signal input port, OUT is the signal output port, V_{+s} is positive supply voltage port, V_{-s} is the negative supply voltage port; (b) photo of the calibration component installed on the 2 K cold stage; (c) equipment connection diagram for the SOLT calibration experiment.

号通过同轴线连接至矢量网络分析仪 (E5080A, Keysight), 设置矢量网络分析仪频率扫描范围为 10 kHz—9 GHz, 扫描点数为 2000 个, 输入功率为 -50 dBm 等, 再选择矢量网络分析仪中的 SOLT 校准程序对电路板上的 SOLT 端口分别进行校准操作. 校准完毕后连接电路的输入输出端口进行传输特性 (S_{21}) 等曲线测量.

图 5(a) 展示了不同温度下 (300 K, 77 K, 40 K 和 4.2 K), OPA855 放大电路的功耗随供电电压的变化曲线. 可以看到, 在相同供电电压 ± 2.5 V 下, 功耗随温度的降低而下降, 即在 300 K 时为 85 mW, 4.2 K 时为 15 mW. 这是由于 BiCMOS 工艺的芯片在低温下, 静态电流会随温度的降低而降低, 导致功耗降低 [33].

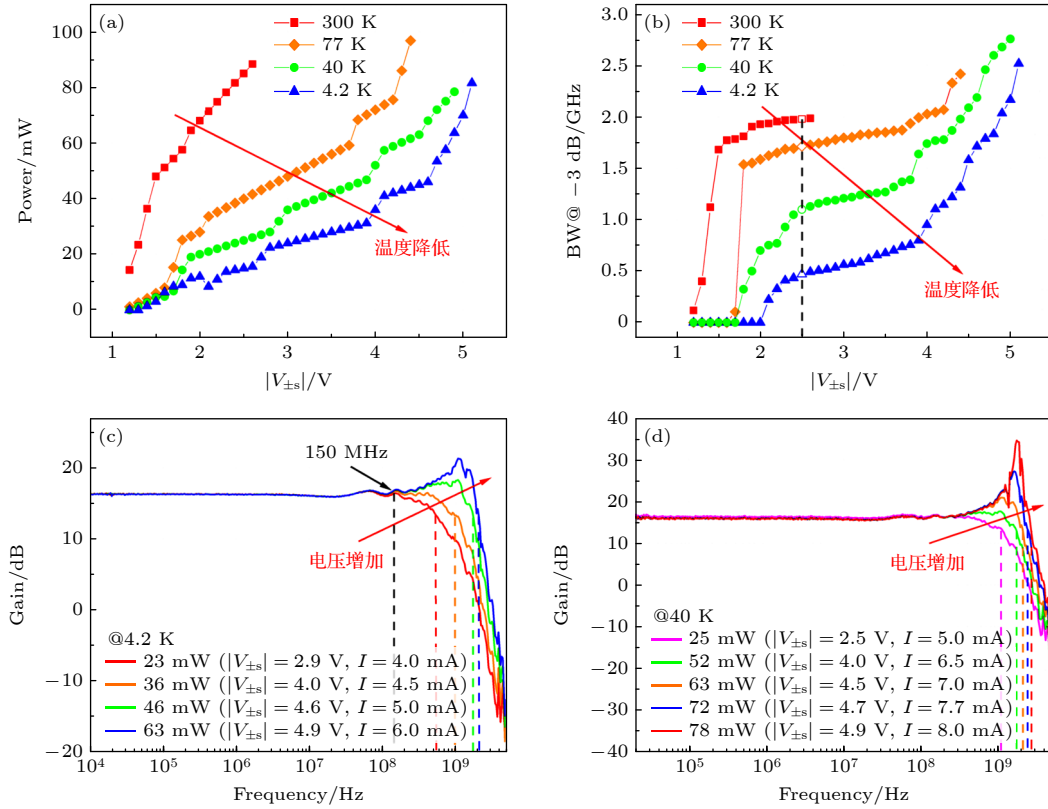


图 5 OPA855 放大电路的性能测量结果 (a) 不同温度下, 功耗随电压的变化关系; (b) 不同温度下, 带宽和功耗的变化关系; (c) 相同温度 4.2 K 下, 增益-频率的函数在不同功耗下的表现; (d) 40 K 下, OPA855 的增益-频率特性曲线

Fig. 5. Performance measurements of the OPA855 amplifier circuit: (a) Relationship between power consumption and voltage at different temperatures; (b) the relationship between bandwidth and power consumption at different temperatures; (c) gain as a function of frequency at the same temperature of 4.2 K, with different power consumptions; (d) gain-frequency characteristic curve of the OPA855 circuit at 40 K.

图 5(b) 展示了在不同温度下, 带宽随着供电电压的变化曲线. 首先, 在相同温度下, 带宽随着供电电压的增大而增加; 在相同供电电压下, 其带宽随着温度的降低而降低. 这表明, 低温下 OPA855 芯片的开启电压会升高, 所以, 可以通过增大供电电压来补偿带宽的损失, 而相应的代价是读出电路的功耗会增大. 以正负供电端口 $\pm 2.5\text{ V}$ 供电为例 (图中垂直虚线对应位置), 从 300 K, 77 K, 40 K, 4.2 K, 对应的带宽依次为 2.0 GHz, 1.7 GHz, 1.1 GHz, 472 MHz. 而在 4.2 K 时, 供电电压提升至 $\pm 4.9\text{ V}$ 时, 带宽为 2.1 GHz, 功耗为 58 mW.

图 5(c) 展示了在同一温度 (4.2 K) 下, 不同供电电压时, OPA855 放大电路的幅频特性测量曲线. 随着供电电压的增大, 增益在低频段 ($f < 150\text{ MHz}$) 基本保持不变, 为 16.2 dB; 当 $f > 150\text{ MHz}$ 时, 幅频特性曲线随电压提升不断上翘, 带宽也不断增加. 比如, 在 $\pm 2.9\text{ V}$ 下, 带宽为 548 MHz; 在 $\pm 4.9\text{ V}$ 下, 带宽为 2.1 GHz. 由于使用的 OPA855

芯片为商用产品, 其开环频率响应特性主要由运算放大器内部的电容、电阻和其他元件决定. 在某些特定频率附近 (比如 2.3 GHz), 存在右半平面的零点, 而在更高频率处则存在多个极点 [27], 由于零点和极点对相位提前作用, 这导致在频率大于 1 GHz 时相移的增大, 从而引起相位裕量迅速减小. 此外, PCB 设计中的寄生电容效应也会影响零极点的位置从而影响相移变化. 由于本次设计把放大器接成闭环形式, 相位裕量快速减小导致阻尼系数减小, 从而引起增益迅速增大的现象, 即增益尖峰. 图 5(d) 展示了在 40 K 温区下的增益曲线, $\pm 4.9\text{ V}$ 供电电压时, 读出电路电流为 8 mA, 功耗为 78 mW, 电路增益为 16.7 dB, -3 dB 带宽为 2.7 GHz, 此时电路谐振峰最大, 电路最不稳定, 2.7 GHz 为电路带宽的极限值. 如果想要减少这种高频区域的非理想响应, 可以适当降低放大器的工作电压, 但这会以带宽减小为代价.

上述研究表征了 OPA855 读出电路经过校准

后在不同温度下 (300 K, 77 K, 40 K, 4.2 K) 的工作特性, 并实现了大于 2 GHz 的带宽.

4 OPA855 直流耦合电路与 SNSPD 器件级联

本实验采用 G-M 制冷机, 在 2.2 K 下的制冷量有限 (小于 2 mW) 而 OPA855 放大电路功耗较大, 所以本研究将直流耦合读出电路固定在 40 K 温区 (制冷量 \sim 3 W), 并将它和安装在 2 K 冷台的 SNSPD 器件相连, 研究该读出电路对 SNSPD 的脉冲波形、转变电流、效率以及计数率的影响. 研究中使用的 SNSPD 器件结构参数为 80 nm 线宽, 80 nm 线条间距, 15 μ m 光敏面直径, 7 nm 厚 NbN 材料. SNSPD 器件采用 DBR 光学腔设计^[8], 以增强器件探测效率. 本研究测量了 SNSPD 信号经过直流耦合放大电路后的转变电流、脉冲波形、探测效率和计数率等性能参数, 并与常规的、交流耦合的室温放大电路的测试结果进行比较. 在常规电路中, 一般使用室温低噪声放大器为 LNA-650 (RF Bay Inc.), 其带宽范围为 30 kHz—600 MHz, 增益约为 50 dB.

图 6(a) 展示了 LNA650 交流耦合读出电路. 其中, 电学测试系统的主要功能是探测和采集 SNSPD 产生的电脉冲信号. 本研究使用一个直流电压源 (SIM928, SRS Inc.) 通过 100 k Ω 的串联电

阻, 为 SNSPD 提供电流偏置, 其电流步进控制精度可达 0.01 μ A. 信号经同轴线输入到探测器上, 而 SNSPD 输出信号经同轴线传输到室温 Bias-Tee 上, Bias-Tee 内置的隔直电容 C_1 将信号耦合到室温放大器 LNA650 上; C_1 的电容效应会对 SNSPD 性能产生影响. 图 6(b) 展示了基于 OPA855 的 SNSPD 直流耦合放大电路. SNSPD 产生的电压脉冲信号, 通过低温同轴线直接传输到位于 40 K 温区的 OPA855 低温直流耦合的一级放大器 (不需要使用隔直电容); 再经过室温端的二级低噪声放大器 (LNA-2000, RF Bay Inc.) 进一步放大, 最终脉冲信号由室温下脉冲计数器 (SR400, SRS Inc.) 或高速示波器进行测量, 实物照片如图 6(c) 所示. SNSPD 的探测性能测量采用文献 [8] 中的报道方法, 即经过入射光功率的准确标定、光偏振方向调节等常规测量流程.

图 7(a) 及其插图展示了使用 OPA855 直流耦合电路、LNA650 交流耦合电路分别测量同一个 SNSPD 器件得到的 I - V 特性曲线. 为清晰起见, 本文仅绘制了它们的 1/4 象限的局部放大图. 由于直流耦合会带来 SNSPD 器件偏置电流的偏移, 图 7(a) 中的主图展示是直流偏移修正后的结果. 由于两种电路采用供电方式的差异 (恒流源、恒压源), 使得 I - V 曲线呈现的方式有所差别; 不过, 在横轴电压为零处, 均对应各自测量到的转变电流: \sim 15.8 μ A (OPA855 电路); \sim 16.2 μ A (LNA650 电路).

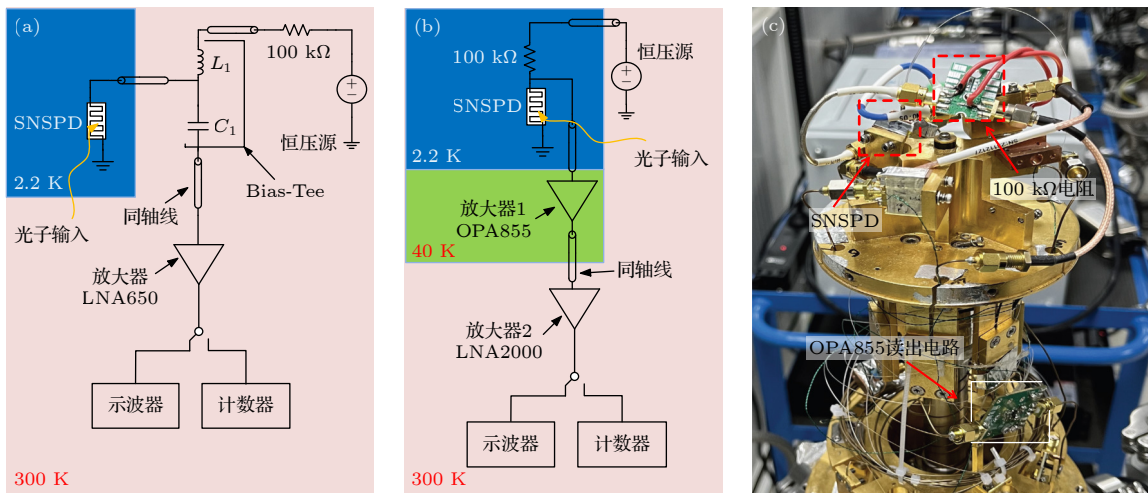


图 6 SNSPD 器件光-电测试系统示意图 (a) LNA650 交流耦合读出电路; (b) OPA855 直流耦合读出电路; (c) SNSPD 与 OPA855 低温直流耦合读出电路系统的实物照片

Fig. 6. Schematic diagram of the SNSPD device optical-electrical test system: (a) AC coupling readout circuit using LNA650 amplifier; (b) DC coupling readout circuit using OPA855 chip; (c) photos of SNSPD and cryogenic DC coupling readout circuit using OPA855 chip.

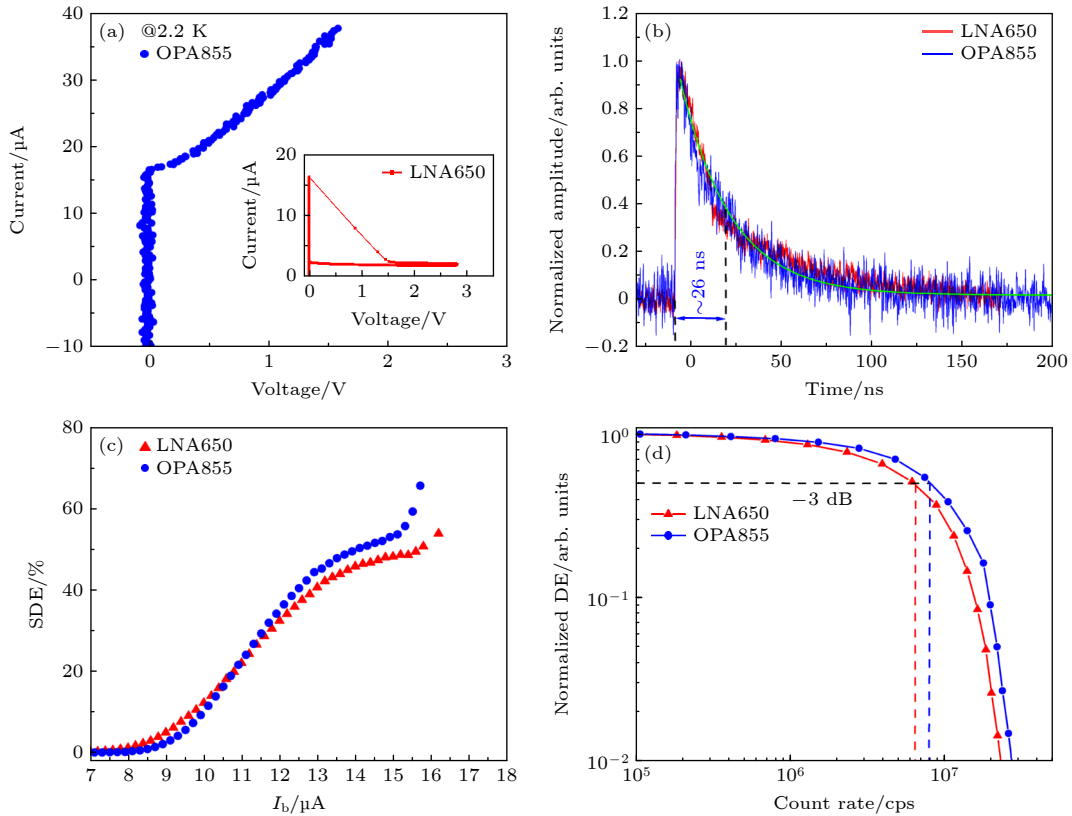


图 7 直流耦合模式 (OPA855) 与交流耦合模式 (LNA650) 下, 对同一 SNSPD 性能进行测量的结果对比 (a) 2.2 K 下, I - V 曲线的测量结果, 主图为 OPA855 直流耦合读出电路, 插图通常为交流耦合电路; (b) 归一化后的读出脉冲波形对比, 其中 OPA855 的输出脉冲经过了室温二级放大; (c) 系统探测效率随偏置电流曲线的对比; (d) 归一化的探测效率随计数率变化的结果对比, 其中垂直虚线所对应的横坐标为效率下降 -3 dB 时所对应的计数率值

Fig. 7. Comparison of measurement results of the same SNSPD performance in DC coupling (OPA855) and AC coupling (LNA650): (a) I - V curves measured at 2.2 K, the main picture shows the OPA855 DC coupling readout circuit and the inset shows the result measured by the AC coupling circuit; (b) normalized readout pulses, in which the output pulse of the OPA855 is further amplified by the secondary amplifier at room temperature; (c) system detection efficiency versus bias current curves; (d) normalized detection efficiency versus the count rate, the vertical dotted line is the corresponding count rate value when the normalized detection efficiency drops to -3 dB (0.5 times) of its original value.

图 7(b) 展示了两种耦合模式下, 归一化后的、SNSPD 输出脉冲的结果对比, 两种模式输出的脉冲波形相似. 上升沿时间分别为 ~ 600 ps (OPA855) 和 ~ 742 ps (LNA650). 其中, 上升沿时间定义为上升沿幅值的 10%—90% 之间的时间差值. 而脉冲下降沿时间, 通过 $1/e$ 函数拟合, 结果约为 26 ns.

图 7(c) 展示了不同电路耦合方式下, 对同一个 SNSPD、测量的系统探测效率 (system detection efficiency, SDE) 随偏置电流 (I_b) 的关系. SDE 曲线随电流变化, 呈现出弱饱和的平台. 在高偏置电流区域 (临近转变电流附近), SDE 曲线会出现偏离“S 线型”的“上翘”现象, 这是由于高偏置区域的暗计数未完全扣除导致的, 通过时间关联计数的方式, 可以消除这种“上翘”现象. 在测量过程中, 光纤与 SNSPD 探测器的耦合, 由于采用螺钉固定的

机械封装方式^[34], 每次升降温后, 光纤盖的微动会导致耦合效率发生偏差, 因此测得的最大 SDE 存在 9% 左右的偏差. 这里的最大 SDE 是指测量的 SDE 曲线在高偏置电流区域未开始“上翘”前对应的最大数值.

图 7(d) 展示了不同电路耦合方式下, 归一化探测效率随着计数率变化的曲线; 图中横坐标和纵坐标均采用对数坐标形式. 本文将最大计数率定义为归一化探测效率下降至 -3 dB 时所对应的计数率值. 图中标记为 LNA650 的曲线, 采用传统交流耦合方式读出, 同时在室温端并联了 50Ω 分流电阻, 其最大计数率约为 6.5 Mcps (1 Mcps = 1 MHz). 而 OPA855 为采用直流耦合方式读出, 放大器输入电阻 $R_4 = 50 \Omega$ 时, 对应的最大计数率约为 8.1 Mcps. 采用直流耦合方式相较于传统交流耦合

方式计数率约有 1.3 倍的提升. 相应地, 其归一化探测效率随计数率的增加降低的幅度会更加缓慢. 在归一化效率为 0.01 时, 其计数率约 27.1 Mcps.

目前, 本研究将 OPA855 低温直流耦合放大电路放置在 40 K 温区下, 并与 SNSPD 级联, 实现了对 SNSPD 的脉冲波形、转变电流测量、探测效率和计数率等参数的稳定测量. 相较于传统的室温交流耦合方式, SNSPD 的最大计数率提升了大约 1.3 倍. 本研究采用 50 Ω 阻抗的传输线连接 SNSPD 器件 (在 2 K 冷台) 和 OPA855 放大器 (在 40 K 冷台), 使得直流耦合读出电路的负载阻抗受到限制. 未来, 使用更高阻抗的传输线可能会进一步改善该直流耦合方式的最大计数率. 当然, 对于其他类型的放大器, 如 FHX13 LG 管芯等, 它们可能拥有更出色的性能, 但这需要进一步研究来确认.

5 结 论

本研究使用商用运算放大器 OPA855 芯片, 并结合同向输入负反馈的结构, 构建了一个低温直流耦合读出放大器. 本文系统地表征了该放大器在室温 and 低温下 (最低至 4.2 K) 的功耗、增益、带宽等参数. 通过提升放大器的供电电压, 可以补偿低温下的带宽损失, 最终在 40 K 温区实现了在 ± 4.9 V 供电电压下, 放大电路功耗为 78 mW, 增益为 16.7 dB, 带宽为 2.7 GHz. 接着, 本研究将 OPA855 放大电路放置在 40 K 温区下, 并与 SNSPD 级联, 实现了对 SNSPD 的脉冲波形、转变电流测量、探测效率和计数率等参数的稳定测量. 相较于传统的室温交流耦合方式, SNSPD 的最大计数率提升了大约 1.3 倍. 此研究为在低温环境下应用 OPA855 芯片, 以及实现 SNSPD 的低温直流耦合读出方式等方面提供了有益的参考信息.

数据可用性说明

本篇论文的关联数据可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00022> 中访问获取.

参考文献

[1] Liu Y, Zhang W J, Jiang C, Chen J P, Zhang C, Pan W X, Ma D, Dong H, Xiong J M, Zhang C J, Li H, Wang R C, Wu J, Chen T Y, You L X, Wang X B, Zhang Q, Pan J W 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 210801

[2] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, Chen M C, Peng L C, Luo Y H, Qin J, Wu D, Ding X, Hu Y, Hu P, Yang X Y, Zhang W J, Li H, Li Y X, Jiang X, Gan L, Yang G W, You L X, Wang Z, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2020 *Science* **370** 1460

[3] Guan Y Q, Li H C, Xue L, Yin R, Zhang L B, Wang H, Zhu G H, Kang L, Chen J, Wu P H 2022 *Opt. Lasers Eng.* **156** 107102

[4] Zhang X Y, Zhang W J, Zhou H, Zhang X F, You L X, Li H, Fan D H, Pan Y M, Yu H Q, Li L Y, Wang Z 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **28** 3803708

[5] Hu N, Meng Y, Zou K, Feng Y F, Hao Z F, Steinhauer S, Gyger S, Zwiller V, Hu X L 2022 *Optica* **9** 346

[6] Zhou F, Chen Q, Liu H, Dai Y, Wei C, Yuan H, Wang H, Tu X C, Kang L, Jia X Q, Zhao Q Y, Chen J, Zhang L B, Wu P H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 068501 (in Chinese) [周飞, 陈奇, 刘浩, 戴越, 魏晨, 袁杭, 王昊, 涂学凑, 康琳, 贾小氢, 赵清源, 陈健, 张蜡宝, 吴培亨 2024 物理学报 **73** 068501]

[7] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, Lipatov A, Semenov A, Smirnov K, Voronov B, Dzardanov A, Williams C, Sobolewski R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 705

[8] Zhang W J, You L X, Li H, Huang J, Lü C L, Zhang L, Liu X Y, Wu J J, Wang Z, Xie X M 2017 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **60** 120314

[9] Marsili F, Verma V B, Stern J A, Harrington S, Lita A E, Gerrits T, Vayshenker I, Baek B, Shaw M D, Mirin R P, Nam S W 2013 *Nat. Photonics* **7** 210

[10] Korzh B, Zhao Q Y, Allmaras J P, Frasca S, Autry T M, Bersin E A, Beyer A D, Briggs R M, Bumble B, Colangelo M, Crouch G M, Dane A E, Gerrits T, Lita A E, Marsili F, Moody G, Peña C, Ramirez E, Rezac J D, Sinclair N, Stevens M J, Velasco A E, Verma V B, Wollman E E, Xie S, Zhu D, Hale P D, Spiropulu M, Silverman K L, Mirin R P, Nam S W, Kozorezov A G, Shaw M D, Berggren K K 2020 *Nat. Photonics* **14** 250

[11] Zhang W J, Huang J, Zhang C J, You L X, Lü C L, Zhang L, Li H, Wang Z, Xie X M 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 2200204

[12] Dauler E A, Grein M E, Kerman A J, Marsili F, Miki S, Nam S W, Shaw M D, Terai H, Verma V B, Yamashita T 2014 *Opt. Eng.* **53** 081907

[13] Ma L Y, Zhang X Y, Shu Z Y, Xiao Y, Zhang T Z, Li H, You L X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 158501 (in Chinese) [马璐瑶, 张兴雨, 舒志运, 肖游, 张天柱, 李浩, 尤立星 2022 物理学报 **71** 158501]

[14] Kerman A J, Rosenberg D, Molnar R J, Dauler E A 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 144511

[15] Zhao Q Y, Jia T, Gu M, Wan C, Zhang L B, Xu W W, Kang L, Chen J, Wu P H 2014 *Opt. Lett.* **39** 1869

[16] Tan J R, Li H C, Zhang L B, Ji T H, Li H, Fei Y, Zhang B, Guo S Y, Guan Y Q, Chen Q, Tu X C, Zhao Q Y, Jia X Q, Chen J, Kang L, Wu P H 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 142601

[17] Weinreb S, Bardin J C, Mani H 2007 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **55** 2306

[18] Shan W L, Yang J, Shi S C, Yao Q J, Zuo Y X, Lin Z H, Chen S H, Zhang X G, Duan W Y, Cao A Q, Li S, Li Z Q, Liu J, Zhong J Q 2012 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **2** 593

[19] Zhang W, Gao J R, Hajenius M, Miao W, Khosropanah P, Klapwijk T M, Shi S C 2011 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 378

[20] Bardun J 2022 *Beyond-Classical Computing Using Superconducting Quantum Processors IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) San Francisco, CA,*

- USA, 422
- [21] Le Guevel L, Billiot G, Paz B C, Tagliaferri M L V, De Franceschi S, Maurand R, Cassé M, Zurita M, Sanquer M, Vinet M, Jehl X, Jansen A G M, Pillonnet G 2020 *Appl. Phys. Rev.* **7** 041407
- [22] Sadrozinski H F W, Seiden A, Cartiglia N 2018 *Rep. Prog. Phys.* **81** 026101
- [23] D'Incecco M, Galbiati C, Giovanetti G K, Korga G, Li X R, Mandarano A, Razeto A, Sablone D, Savarese C 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1005
- [24] Geng X, Luo S Y, Li L, Chen Q, Sun M 2021 *Opt. Quantum Electron.* **53** 687
- [25] Ge J J, Li C H, Zhang D, Yang Y F, Wang A N, Yang X, Liang H, Liu Y W 2022 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.* **1040** 167222
- [26] Cahall C T 2019 *Ph. D. Dissertation* (America: Duke University)
- [27] Texas instruments. <https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa855.pdf> [2018-07]
- [28] Kerman A J, Dauler E A, Keicher W E, Yang J K W, Berggren K K, Gol'tsman G, Voronov B 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 111116
- [29] Franco S 2002 *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits* (Vol. 1988) (McGraw-Hill New York)
- [30] Texas instruments. <https://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa855IDSGEVM.pdf>
- [31] Berggren K K, Zhao Q Y, Abebe N, Chen M J, Ravindran P, McCaughan A, Bardin J C 2018 *Supercond. Sci. Technol.* **31** 055010
- [32] Rumiantsev A, Ridler N 2008 *IEEE Microw. Mag.* **9** 86
- [33] Bardin J C 2009 *Ph. D. Dissertation* (California Institute of Technology)
- [34] Zhang W J, Xu G Z, You L X, Zhang C J, Huang H, Ou X, Sun X Q, Xiong J M, Li H, Wang Z, Xie X M 2021 *Opt. Lett.* **46** 1049

Cryogenic DC-coupled readout electronics for high-speed superconducting nanowire single-photon detectors based on a commercial operational amplifier*

Chen Zhi-Gang¹⁾²⁾ Zhang Wei-Jun^{1)2)†} Zhang Xing-Yu¹⁾ Wang Yu-Ze¹⁾
 Xiong Jia-Min¹⁾ Hong Yi-Yu¹⁾²⁾ Yuan Pu-Sheng¹⁾
 Wu Ling¹⁾ Wang Zhen¹⁾²⁾ You Li-Xing¹⁾²⁾

1) (Shanghai Key Laboratory of Superconductor Integrated Circuit Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

2) (Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 19 March 2024; revised manuscript received 10 May 2024)

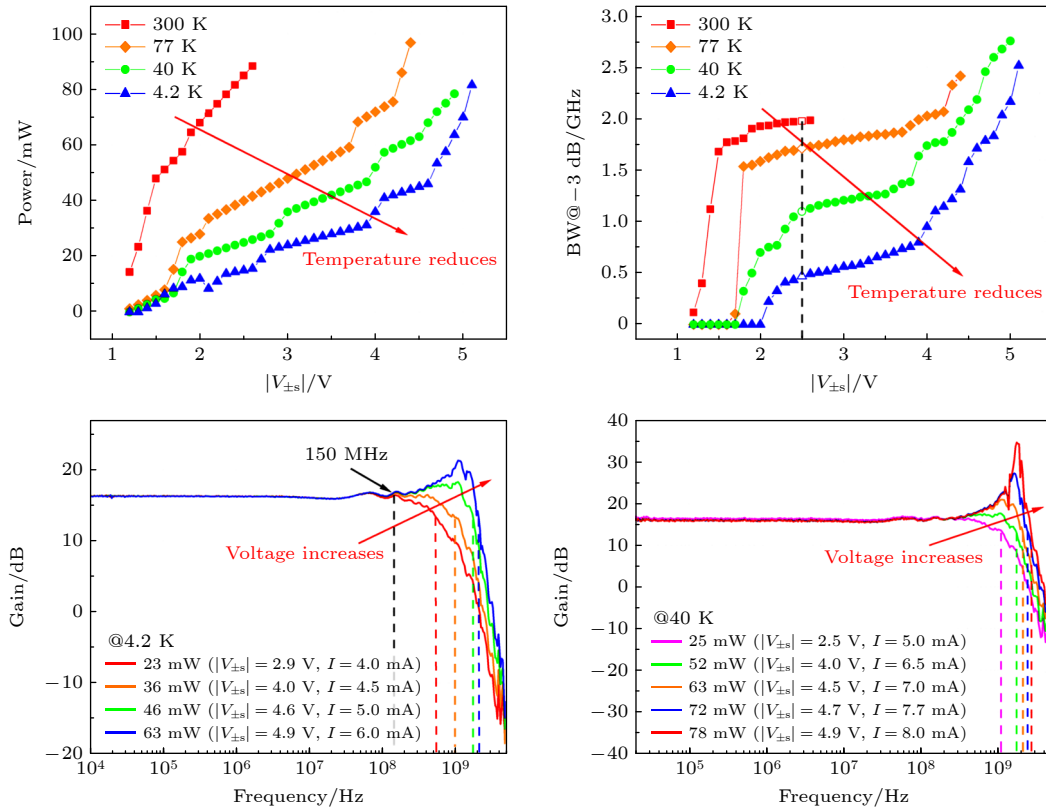
Abstract

Superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPD) have the advantages of high maximal counting rate (MCR), high detection efficiency, and low dark count rate. They play an important role in the fields of optical quantum communication, optical quantum computing, laser ranging, and imaging. The MCR (i.e. detection speed) of SNSPD can be affected by the front-end readout circuit. To increase MCR, it is usually necessary to use a cryogenic DC-coupled readout circuit with a broad bandwidth. This study reports an SNSPD cryogenic DC-coupled amplification readout circuit based on a commercial high-speed operational amplifier chip OPA855. We systematically characterize its performance parameters in a temperature range from a room temperature of 300 K to a low temperature of 4.2 K. We address the problem of bandwidth loss of the circuit in a low-temperature environment by increasing the operating voltage of the OPA855 chip. For example, at 40 K,

* Project supported by the Innovation Program 2030 for Quantum Science and Technology, CHina (Grant No. 2023ZD0300100), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62371443, 61971409), the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant Nos. 18511110202, 2019SHZDZX01), the Shanghai Sailing Program (Grants No. 21YF1455500), and the Outstanding Member of the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, China.

† Corresponding author. E-mail: zhangweijun@mail.sim.ac.cn

the operating voltage increases from ± 2.5 V to ± 4.9 V, and the quiescent current is about 8 mA, which is equivalent to a power consumption of 78 mW; meanwhile, the gain of this readout circuit is 16.7 dB, and the -3 dB cutoff bandwidth is ~ 2.7 GHz. We further install a cryogenic DC-coupled readout circuit based on the OPA855 amplifier at 40 K and characterize the performance parameters of the SNSPD at 2.2 K, such as the switching current, system detection efficiency, and MCR. The comparison with the conventional AC-coupled readout circuit at room temperature shows that the MCR increases about 1.3 times after using the DC-coupling circuit. Our study provides the interesting information about the OPA855 amplifier's performance at low temperatures which facilitates its application in cryogenic environments and related fields.



Keywords: operational amplifier, cryogenic readout electronics, DC coupling, superconducting nanowire single photon detector

PACS: 85.25.-j, 85.60.Gz, 07.20.Mc, 84.30.Le

DOI: 10.7498/aps.73.20240398

基于运算放大器的超导纳米线单光子探测器低温直流耦合读出电路

陈志刚 张伟君 张兴雨 王钰泽 熊佳敏 洪逸裕 原蒲升 吴玲 王镇 尤立星

Cryogenic DC-coupled readout electronics for high-speed superconducting nanowire single-photon detectors based on a commercial operational amplifier

Chen Zhi-Gang Zhang Wei-Jun Zhang Xing-Yu Wang Yu-Ze Xiong Jia-Min Hong Yi-Yu Yuan Pu-Sheng Wu Ling Wang Zhen You Li-Xing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 138501 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240398

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240398>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高综合性能超导纳米线单光子探测器

High comprehensive performance superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2023, 72(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230326>

自差分交流偏置超导纳米线单光子探测器

Superconducting nanowire single photon detector under AC-bias with self-differential readout

物理学报. 2022, 71(15): 158501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220373>

超大面积超导纳米线阵列单光子探测器设计与制备

Design and fabrication of single photon detector with ultra-large area superconducting nanowire array

物理学报. 2022, 71(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221569>

高效、偏振不敏感超导纳米线单光子探测器

High-efficiency polarization-insensitive superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210486>

超导纳米线单光子探测器光子响应机制研究进展

Research progress of photon response mechanism of superconducting nanowire single photon detector

物理学报. 2021, 70(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210652>

面向机载平台的小型超导单光子探测系统

Miniaturized superconducting single-photon detection system for airborne platform

物理学报. 2023, 72(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230248>