

文章编号: 2095-4980(2016)04-0640-07

超导纳米线单光子探测器偏置电源系统设计

康 峰, 商慧亮, 陈 雄, 孔庆生

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

摘 要: 超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是一种新型的单光子探测器, 相对于传统的半导体单光子探测器件, 具有高计数率、低暗计数等明显优势, 然而SNSPD需要在接近临界状态的偏置条件下和多个模块配合才能触发热点效应。本文设计了一种NbN材料的超导纳米线单光子探测实验系统用的偏置电源系统, 辅助功能是温度控制和信号调理。实验表明, 4个通道可以独立稳定输出精确度为 $0.1 \mu\text{A}$ 且 $0\sim 99.9 \mu\text{A}$ 区间可调的恒流偏置, 温度测量的精确度为 0.05 K , 热点效应产生的脉冲信号被调理后成功地被分析仪器检测到, 满足单光子探测的要求。

关键词: 单光子探测器; 超导; 偏置; 精确度

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0640

Design of high-accuracy bias power supply system for SNSPD

KANG Feng, SHANG Huiliang, CHEN Xiong, KONG Qingsheng

(Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Single Photon Detector (SPD) is a kind of instrument with ultra-low noise and extremely high sensitivity. It is able to detect and count the smallest energy quantum-photon, to realize the detection of weak signal. Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD) is one of new type SPDs, which has many advantages over traditional SPD, including high count rate, low dark counts and so on. However, it is only when SNSPD runs at critical state on bias mode and works with many other modules that could trigger hotspot effect. In this paper, a bias power supply system is designed for the experimental system of SNSPD based on superconducting characteristics of NbN, coupled with functions of temperature control and signal conditioning. Experiment shows that stable parallel constant current biases can be output from four channels with a precision of $0.1 \mu\text{A}$, a range from 0 to $99.9 \mu\text{A}$, and temperature precision of 0.05 K ; and pulses generated by hotspot effect are regulated through signal conditioning and then detected successfully by analytical instrument, which can meet the requirements of single photon detection.

Key words: Single Photon Detector; superconductor; bias; precision

超导纳米线单光子探测器(SNSPD)是一种新式光电探测仪器, 利用热点效应, 可对入射的单个光子进行计数, 实现对极微弱目标信号的探测。SNSPD 工作在近红外波段, 即 $700 \text{ nm}\sim 2\ 500 \text{ nm}$ 波长, 具有暗计数低、低抖动、响应频谱宽、重复速度快等优点。它在光纤传感、高分辨力的光谱测量^[1]、非破坏性物质分析、飞行时间质谱^[2]、生物发光、激光测距、量子通信等领域有着广泛应用。

从 2001 年 Goltsman 教授小组首次成功完成 SNSPD 实验, 到 2016 年 15 年的发展时间, SNSPD 在 $1\ 550 \text{ nm}$ 工作波长的探测效率从开始的不足 1% 已经提升到 70% 以上甚至超过 90%, 远超过半导体 SPD 探测效率。作为一种具有广阔应用前景的超导探测器, 超过 10 个国家, 近 30 家大学或研究机构开展相关研究工作。国际上著名的大学或研究机构主要是美国的 NIST 和 MIT, 俄罗斯的 MSPU, 日本的 NICT, 英国的格拉斯哥大学, 荷兰的 TU Eindhoven 等。国内开展相关研究的大学或研究机构主要有清华大学、南京大学、上海微系统所、物理所等。

系统集成技术一直是制约超导电子学走向规模化应用的一个亟需解决的问题。对于 SNSPD 应用来说, 系统集成技术同样非常关键, 主要包括制冷技术和电路技术两方面。本文针对电路技术方面设计了一套集成了偏置电源、温度控制和信号调理的多功能仪器系统。

收稿日期: 2015-12-30; 修回日期: 2016-04-05

基金项目: 上海市科学技术委员会基金资助项目(15DZ1201803)

1 SNSPD 的工作原理和系统结构

SNSPD 的工作原理是利用超薄超导纳米线的热点效应^[3], 如图 1 所示, 其中(i): 器件工作温度明显低于临界温度, 将超导纳米线的电流偏置在小于但非常接近其临界电流的状态, 由于单光子的能量(~ 1 eV)比超导材料的能隙(~ 5 meV)高 2~3 个数量级; (ii): 当一个红外波段的光子打到纳米线条上后; (iii): 破坏了大量库珀电子对, 形成热电子群, 增殖成一个热点区域; (iv): 该区域内超导电性被抑制甚至完全破坏, 使得超导电流只能从区域两侧流过, 热电子向外扩散, 热点区域变大, 从而该区域两侧流过的电流密度增大, 直至超过超导临界电流; (v): 导致纳米线上形成一个横跨线条的有阻势垒, 超导态进入电阻态, 微桥两端产生了一个电压脉冲, 可通过读取这个电压脉冲信号的存在与否来检测光子; (i): 由于超导材料的弛豫时间很短, 只有几十皮秒的量级, 当探测器接收到一个光子后能量很快通过衬底和热点附近的纳米线条弛豫出去, 使其温度迅速降低, 纳米线条重新回到超导态, 器件就可以接收下一个光子。值得注意的是, 如果超导材料的厚度不够, 导致热弛豫能力不足, 焦耳热超过弛豫能力形成正反馈, 纳米线的有阻区会一直存在直至稳定, 该现象被称为跳锁(latching)现象。

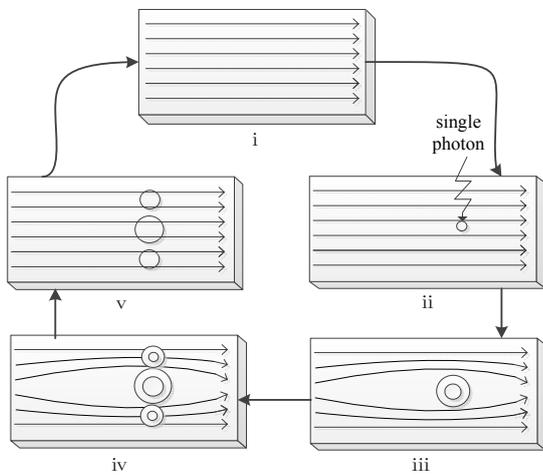


Fig.1 Diagram of process of hotspot response
图 1 热点响应过程原理示意图

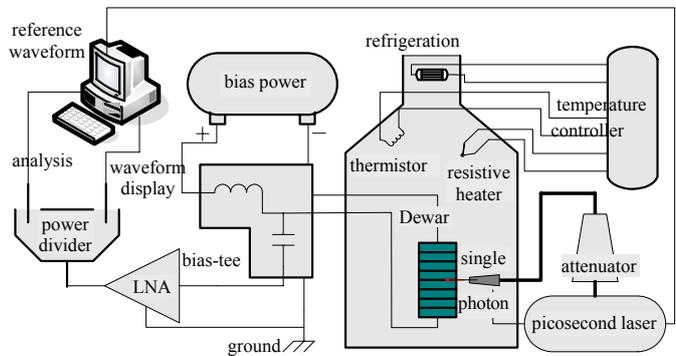


Fig.2 Diagram of SNSPD
图 2 SNSPD 系统示意图

SNSPD 系统如图 2 所示, 主要包括激光源和衰减器、超导纳米线、温控系统、偏置电源、信号调理分析模块等。实验器件是一条由超薄氮化铌(Niobium Nitride, NbN)薄膜制备而成的超导纳米线^[4], 线条宽度 100 nm, 线条占比为 50%, 厚度为 4 nm, 器件面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。系统中的偏置输出通过 T 型偏置为超导提供恒定的偏置电流, 偏置的作用是让超导材料处于接近临界电流的超导状态, T 型偏置的作用是将光信号转化为电信号脉冲, 并提供传输回路。因为单光子激发出热电子形成的热点电阻截面, 相对减小的超导截面流过的平均电流增大, 若原偏置电流在此处突破超导临界值, 纳米线条进入电阻态, 此时整个截面电阻就会形成并产生压降。由于热点的弛豫时间只有皮秒级^[5], 所以热点可以形成瞬时脉冲并通过 T 型偏置结构处的发射电容将脉冲信号传送到下一级宽频带低噪声放大器做放大处理。超导 NbN 薄膜纳米线的临界电流大多在 $10 \mu\text{A} \sim 30 \mu\text{A}$ 量级^[6], 因此要求偏置电流精确度尽可能高于微安级别, 而从超导态到电阻态的瞬变需要偏置电流低于但接近临界电流并且恒定在某一值, 这就要求偏置电源的稳定性高, 同时噪声电流须控制在 $0.1 \mu\text{A}$ 以下。

普通的偏置电源仅提供偏置电压或者偏置电流, 但是实验系统还需要输出易检测的脉冲信号。普通电源往往只有两三个通道, SNSPD 实验系统的通道是 6 个, 实际的情况往往使用其中 4 个通道, 而且热点效应产生的脉冲电压的幅值只有 1 mV 左右, 弛豫时间只有几十皮秒, 所以还需要调理脉冲信号以便示波器或者计数器检测到脉冲的到来。因此传统的单功能、少通道的偏置电源已经不能满足单光子检测系统的实际需求, 迫切要求开发一个集成尽可能多功能的电源系统。本文将依据传统电源的弊端和 SNSPD 的诉求, 开发一套多功能的偏置电源系统, 其主要功能是提供四通道的电流或电压偏置的电源, 辅助功能是温度控制和信号调理。

2 系统的结构和设计

本文设计的系统是一套由多种元器件和模块组成的仪器系统, 为了提高系统的稳定性和可靠性, 将所有组成

器件封闭集成在一个立方型的金属机箱，电源模块(锂电池组，开关电源，线性电源)、偏置电路、信号调理模块(包括 T 型偏置和 LNA)都集成在内部。对于前面板：触摸显示屏镶嵌在中部，4 路脉冲输出竖排固定在左前方。对于后面板：系统的加热输出接头和温度传感器接头则安置在左中部，USB 接口放置在中下部，4 路偏置输出竖排固定在右边，中部是一个风扇，将机箱内部的热量排出。系统各模块之间的联系如图 3 所示。首先主控芯片 C8051F340 是系统的控制核心，负责各类信号的采集和控制信号输出；触摸屏上显示各个参数的信息，可以通过触碰来改变参数并串口发送到单片机上；温度模块可以实时监测制冷机温度并且显示在屏幕上，同时触控加热图标可以改变加热状态；隔离模块的作用是将数字信号和模拟信号隔离；偏置电路根据单片机的指令，DA 芯片将数字量转化为模拟偏置输出；电池管理模块负责管理 2 组电池的放电和充电。为保证偏置电源的洁净度，偏置电路用 2 个可充电的锂电池供电，分别提供 $\pm 4.2\text{ V}$ 电压。加热部分和电池充电，以及散热风扇采用 24 V 的开关电源供电，其余部分均采用 16 V,3 A 线性电源供电。

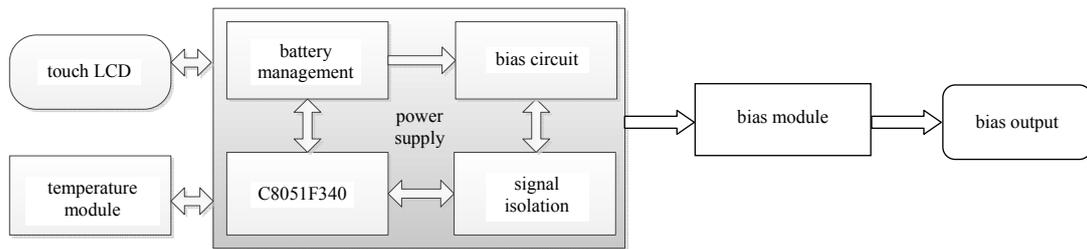


Fig.3 Schematic of bias power supply system
图 3 偏置电源系统的硬件组成图

2.1 单片机 C8051F340

系统用的控制芯片 C8051F340 是基于 51 内核的高速、流水线结构的单片机。内带精确校准的 12 MHz 的内部时钟振荡器，多达 64 KB 的片内 FLASH 存储器，大的容量可以存放查找表的数据，4352 字节的片内 RAM 可以保证程序的顺利运行，由于本系统需要控制多路信息，所以选用有 48 个 I/O 口的 TQFP 封装。该芯片还具有片内上电复位、VDD 监视器、看门狗定时器和时钟振荡器等功能。FLASH 存储器还具有在线系统重新编程的能力，使用 JTAG/C2 对 C8051F340 进行非侵入式的在线调试，可以快速找到软件中的错误，对整个系统硬件电路的修改以及代码的完善提供有效帮助。

2.2 偏置电路与信号调理输出

输出高精度度、低噪声的恒流偏置是该电源系统最主要的功能，实施方案是单片机控制 DA 输出恒定电压，然后再串联一个远大于负载的精密电阻，来实现准恒流输出，因为超导的临界电流只有微安级别，而 DA 一般输出电流是到毫安级别的，远超于其精确度。如图 4 所示，在 16 位 DA 输出端串联一个 20 k Ω 的精密电阻，超导电阻稳定在几十欧姆，先忽略不计，只要 DA 的输出精确度是 2 mV 就能达到 0.1 μA 的恒流精确度。

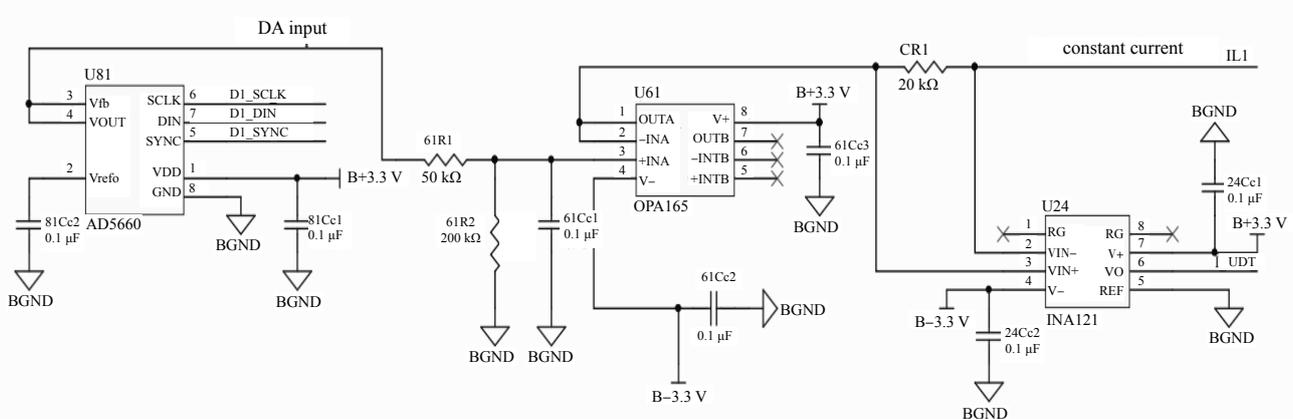


Fig.4 Constant current output
图 4 恒流输出

而 16 位的 AD5660 完全可以满足这一要求。但超导材料的线阻和分压电阻的精确度会造成一定的偏差，可以通过在代码中添加修正因子来保证输出的准确度。单片机把控制信号发送给 DA，整个系统电路基本都选用 3.3 V 供电。由于 AD5660 满量程输出不超过电源供电，内部基准电压 U_{REF} 为 1.25 V，满量程输出为 2.50 V。因为超导实验量程基本不超过 100 μ A 以上电流，也就是说 DA 最高输出 2 V 才能充分利用 DA 的精确度，所以 DA 输出端用 2 个电阻进行分压。这样，理论上恒流精确度可达到 0.001 5 μ A。理想情况下，DA 数字输入和模拟输出转化关系为：

$$U_{out} = 2U_{REF} \left(\frac{D}{2^{16}} \right) \tag{1}$$

式中： U_{out} 是模拟输出值； D 是单片机给 DA 的数字量。

用仪器测得数据后，再经过拟合修正的数字量的表达式为：

$$D' = \left(\frac{2^{16} U_{out} + \phi}{2U_{REF}} \right) \gamma \eta \tag{2}$$

式中： γ 是串联分压的比例系数； ϕ 是初值修正因子； η 是线性修正因子。于是从触摸屏传来的模拟量可以经过式(2)转化为数字量，保证设定的输出值与 DA 输出一致。

串联分压后跟随一级运放 OPA1652，大大减小输出阻抗，降低后级电路对前级电路的影响，起到缓冲隔离的作用，使得电压输出稳定，然后串联一个阻值为 20 k Ω 的高精电阻 R_0 ，恒压输出转化为恒流输出：

$$I_{out} = \frac{U_0}{R_0} \tag{3}$$

没有光子入射时，超导纳米线工作在超导状态下的恒流模式，当光子打在超导纳米线的瞬间，恒流失效^[7]，吸收光子产生的热电子形成一个短暂的电阻态，电阻为几十千欧^[8]，弛豫时间在几十皮秒^[9]，器件两端有一个电压脉冲输出，通过对这个电压脉冲信号的计数实现对入射光子的检测。偏置电流或电压并不是直接与超导负载连接，而是通过一个精密的 T 型装置巧妙地使偏置电源与激励形成的脉冲分离。如图 2 所示，偏置电流或电压属于直流，通过电感为超导提供偏置。首先将超导材料通过 SMA 接入后面板的输入输出接口，一旦有光子打到超导材料，发生热点效应，负载的阻值骤变，形成的电压脉冲又通过电容发射到与 T 装置连接的低噪声(Low Noise Amplifier, LNA)，脉冲信号经过放大传输到机箱前面板的输出端口，然后信号处理分析仪器再与之相连接。

超导本身具有临界电流特性，对超导的研究一般都选用恒流偏置，但由于外界各种噪声的干扰，器件会出现跳锁现象，采用准恒压的偏置方式可有效避免外部原因造成的跳锁问题。如图 5 所示，T 型装置前有一个继电器，继电器的一端接 50 Ω 的精密电阻 r_0 ，另一端接 20 k Ω 的精密电阻 R_0 。继电器常闭时，精密电阻处于悬空状态，偏置电流直接流过 20 k Ω 的精密电阻 R_0 ，即默认为恒流模式。继电器常开时，输出端与 r_0 并联，在未发生热点效应时，超导纳米线处于超导状态，依然有恒定的偏置电流；发生热点效应时，吸收光子后形成有阻区，阻值为几十千欧，然后与 50 Ω 的精密电阻并联，偏置电流被大部分分流到精密电阻上，超导纳米线上的电流减小，然后有阻区的焦耳热就会降低，焦耳热很快地从衬底弛豫出去，恢复到超导态。

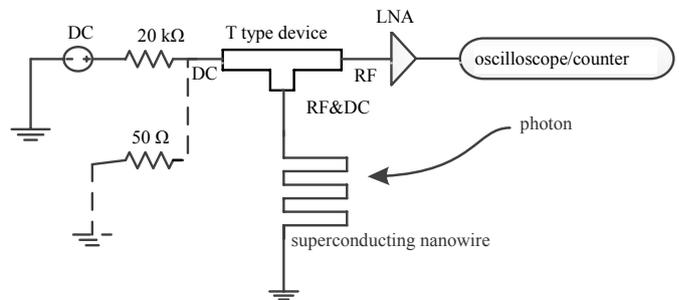


Fig.5 Switch of constant current and constant voltage
图 5 恒流恒压切换

2.3 信号隔离与电池管理

恒流偏置要求达到 0.1 μ A 精确度，即 DA 输出 2 mV，而一般数字电路的电源噪声是几十毫伏，其电源的噪声已经远大于精确度要求。所以通过线性电源或开关电源把交流电转化的直流电再降压给数字电路供电的方案不可行。化学能转化为电能时会产生很稳定的电压，因此偏置电路部分采用电池供电。由于芯片的数字信号会引入噪声，所以为保证输出稳定且能准确显示，将偏置电路单独由电池供电，系统的

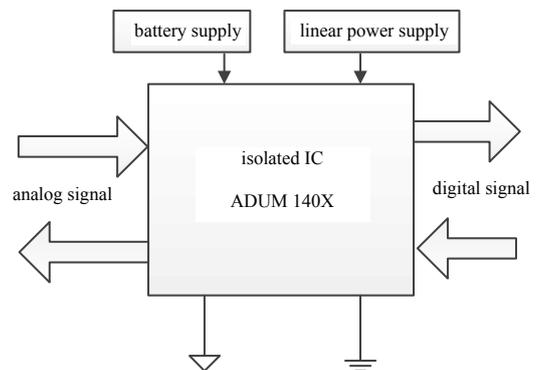


Fig.6 Digital isolation
图 6 数字隔离

其他部分仍用线性电源供电。这两部分在电路板上布局分开,采用不同电源和地,二者之间通过隔离芯片通信,如图 6 所示。

隔离芯片采用 ADUM140X 系列,该系列芯片可以将频率 1 MHz 以上的数字信号滤过噪声传输,适合在 2 个地电平隔离的区域进行通信。单片机与 AD 或 DA 的通信都经过隔离芯片。

电池管理模块控制 2 组电池,一组供偏置电路用,一组充电备用。每组由 2 节电池串联而成,可输出 ± 4.2 V 低噪声的电压。电池选用的是三洋 2 600 mA·h 锂-聚合物电池,带过充电过放电保护板。如图 7 所示, A1, A2 是一组, A2GND 为 A2 的正极,继电器向上充电,向下放电, B1, B2 是一组, B2GND 为 B2 的正极,继电器向上充电,向下放电。程序实时测量电池的电压,当电池电压小于 3.6 V,就认为电池组电量即将耗尽,继电器切换到另一端,此时由备用电池为偏置电路供电,另外一组电池在充电。由于偏置电路的输出功率极小,电池组充满时间远小于消耗完的时间,所以电池组快速充满电后可成为备用,确保偏置部分自动且连续供电。

充电管理芯片选用的是 CN3052A,可以对单节锂离子或者锂-聚合物可充电电池进行恒流/恒压充电。该器件内部包括功率晶体管,应用时不需要外部的电流检测电阻和阻流二极管。热调制电路可以在器件的功耗比较大或者环境温度比较高的时候将芯片温度控制在安全范围内。调制输出电压为 4.2 V,精确度达 1%。充电电流的大小可以通过一个外部电阻调整。其他功能包括自动再充电,芯片使能输入端,电池温度监控以及状态指示等功能。充满后电池放电是纹波可以忽略的低噪声电源。

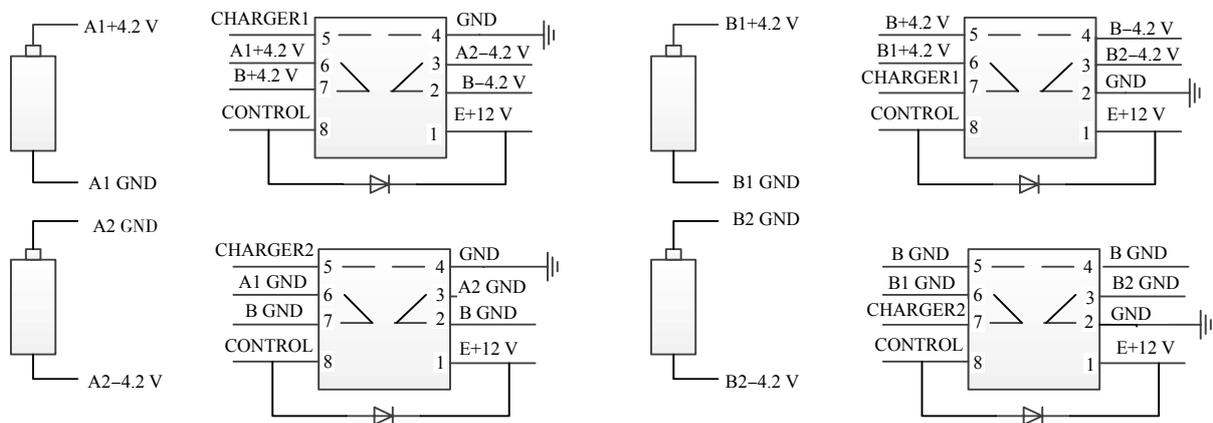


Fig.7 Battery pack switch
图 7 电池组切换

2.4 温度控制模块

温度也是实验系统中一个非常重要的参数,因为制冷机内的温度浮动会增加单光子探测器的暗计数,所以保持瓶内温度的稳定对于提高探测性能至关重要。温度控制模块包括温度测量和加热。温度测量采用查表法,制冷机里放置 1 个温度传感器,事先用精密仪器测量温度传感器的电压和温度对应关系,并制作成查询表,通过 USB 将查询表下载到单片机的 FLASH 里面。偏置电源系统的 LM334 产生 10.0 μ A 恒流作为激励,然后通过后面板接口串联温度传感器,恒流经过温度传感器,电阻两端接到 AD7705 的差分模拟输入,测量温度传感器的电压,进而计算出温度传感器的电压值,通过查询匹配预先存入 FLASH 里的电压温度查找表找到对应的温度,由于温度传感器电压和制冷机里的温度关系并不是严格的线性关系,所以查表可以有效减小非线性误差。

图 8 为温度和电压的关系图,可以观察到,电压随温度的增高而单调递减,电压和温度的关系是一一对应的。本文主要关心的温度区间是 1.2 K~14.1 K,所以在该区间数据比较密集,每隔 0.05 K 一对数据,后面 14.2 K~26.4 K 温度区间每隔 0.1 K 一对数据,26.5 K~100.1 K 温度区间每隔 0.4 K 一对数据,101.1 K~330.2 K 温度区间每隔 1.0 K 一对数据,4 个区间一共采集 929 对数据。

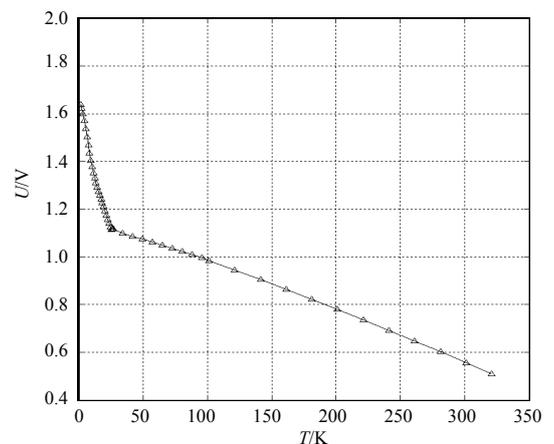


Fig.8 Temperature vs. voltage
图 8 温度电压关系图

当完成一组实验需要换材料时，由于制冷机里面是真空低温状态，制冷机不能立刻打开，但自然升温又需要等待很长时间，所以给制冷机加热，使制冷机内的温度快速地恢复，接近室温，通过触摸屏的触屏键或者薄膜按键都可以控制加热电阻的通断，加热的同时也在测量温度，当温度超过 290 K 时，即室温约 17 °C，控制程序自动关闭加热开关，然后就可以更换超导材料，准备下一次的实验。

3 系统的软件设计

系统软件使用 C 语言编写，在 Keil μ Vision4 环境下编译，并使用 JTAG 调试。如图 9 所示，上电后系统初始化，串口初始化，外围器件 AD 和 DA 等初始化，然后进入主循环。每个循环读取一次对应的 AD 采样值并换算成温度和电池余量后串口发送到显示屏上显示出来。当在触摸屏上有按键被按下时，单片机通过串口中断接收来自触屏的地址和数据信息，单片机根据地址识别是哪一类信息，然后做出输出 DA 输出量，切换电池或改变加热状态等操作。或者有薄膜按键被按下时触发外部中断，然后根据键值做出相应的操作。除此之外，系统还留有与 PC 机进行通信的 USB 接口，可修改 FLASH 温度查询表。

4 测试和结果分析

偏置以外的模块属于一般低速单片机应用，测试系统搭建后，主要是测试 DA 数字输入和模拟输出转化关系的修正系数和偏置输出的精确度。由于偏置电流或电压都很小，一般的万用表或示波器无法满足精确度的要求，所以必需精确度更高的测量仪器。这里选用了吉时利的 6 位数字万用表 Keithley 2450，该仪器的测量精确度是 0.001 mV，即 1 μ V 的电压。针对通道一，在程序里设置 DA 输入数字量，然后仪器测量实际输出值，基于最小二乘法用 Matlab 绘制出 DA 输入数字量值和实测值的拟合直线图，如图 10 所示，首先依据电路图可知串联分压系数 $\gamma=0.8000$ ，因此可以求出线性修正因子 $\eta=1.0039$ ，初值修正因子 $\phi=-2.529$ 。

经过线性修正之后，继续探索输出和输入之间的关系。在触摸屏上输入设置值，然后测量实际输出，实测值在 0.01 mV 刻度值附近波动很大，在 0.1 mV 刻度值附近有 2 或 3 个刻度的波动，而 1 mV 刻度值处稳定无波动，因此可判定中高频噪声已控制在 1 mV 以内，满足当前实验需要。图 11 偏置中最常用段 10 μ A~70 μ A 4 个通道拟合直线图。4 个通道输出基本一致，误差在 0.1 μ A 以下。

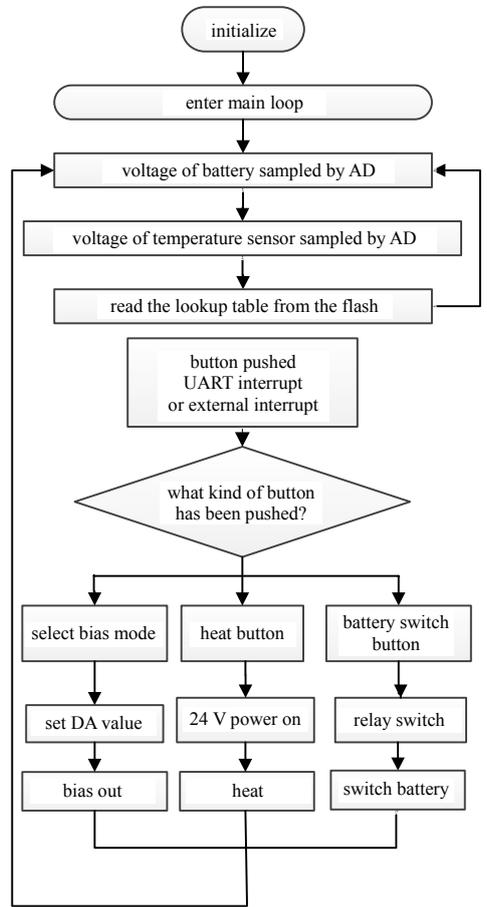


Fig.9 Flowchart of program
图 9 程序流程图

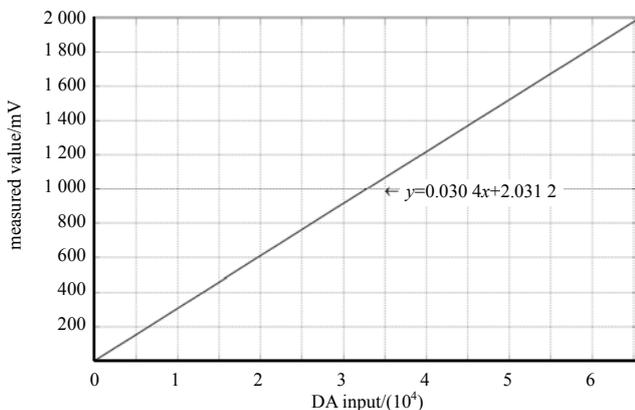


Fig.10 Measured value on channel 1
图 10 通道一的实测值

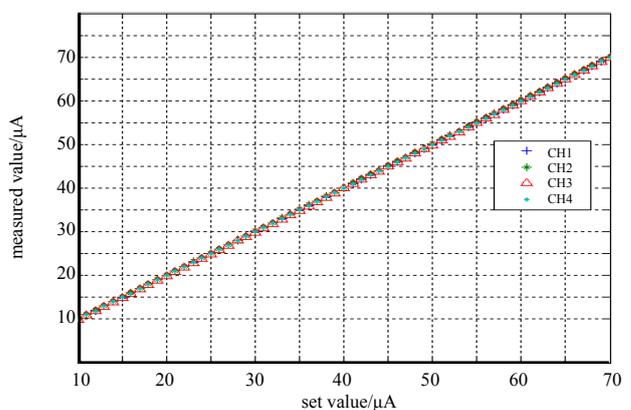


Fig.11 Measured values of four channels on 10 μ A~70 μ A
图 11 四通道 10 μ A~70 μ A 实测值

5 结论和展望

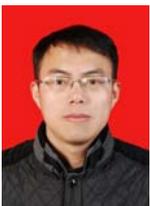
本文所设计的偏置电源系统通过长时间测试,表明电源的输出精确度高,达到了 $0.1 \mu\text{A}$ 的精确度,热点效应产生的脉冲信号经信号调理模块提取放大后被分析仪器检测到,基本满足单光子超导探测实验的偏置和探测要求。为了提高偏置输出的精确度,可以通过选择低温漂的限流电阻和保持实验室内温度恒定;可以再加一个 $10 \mu\text{F}$ 钽电容,并将旁路电容尽可能接近芯片电源引脚,选用等效串联电阻和等效串联电感更小的 $0.1 \mu\text{F}$ 陶瓷电容;PCB 相反层布线尽可能走直角线以减少板上的馈通效应;如果条件允许,最好的电路板布局方式是微带线技术;采取上面的改进方式可以进一步提高系统的稳定性和精确度。另外,系统预留的 USB 接口还可以与 PC 通信,所以可以在 PC 上开发一个上位机程序或者集成到单光子实验的软件系统中,这样可以更方便地使用该仪器。未来可根据实验具体需求,对下一代偏置电源的设计做出相应的改进。

温度测量范围是 $1.2 \text{ K} \sim 330.2 \text{ K}$,在主要关注的温度区间精确度达到 0.05 K ,但由于本文设计的温度的测量是离散的,由于噪声等原因,显示在屏幕上的温度数值可能会在 2 个数值之间波动,可以采用拟合的方式,并加上温度补偿^[10],来避免数值波动的现象。但是这会增加单片机的开销,所以考虑更换控制芯片,采用速度更快、性能更强的 STM32 系列的控制器。

参考文献:

- [1] KARA B S,PEREVERZEV S V,SOIBEL A,et al. Energy-resolved detection of single infrared photo with $\lambda=0.8 \mu\text{m}$ using a superconducting microbolometer[J]. Applied Physics Letters, 2012,101(5):052601.
- [2] 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):023702-023702-3.
- [3] SEMENOV A,ENGEL A,HUBERS H W,et al. Spectral cut-off in the efficiency of the resistive state formation caused by absorption of a single-photon in current-carrying superconducting nano-strips[J]. Physics of Condensed Matter, 2005,47(4): 495-501.
- [4] 尤立星,申小芳,杨晓燕. 超导纳米线单光子探测器件的单光子响应[J]. 科学通报, 2009(16):2416-2420. (YOU Lixing, SHEN Xiaofang,YANG Xiaoyan. The response of single photon for superconducting nanowire single photon-detector[J]. Science Bulletin, 2009(16):2416-2420.)
- [5] II'IN K S,LINDGREN M,CURRIE M,et al. Picosecond hot-electron energy relaxation in NbN superconducting photon detectors[J]. Applied Physics Letters, 2000,76(19):2752-2754.
- [6] 张蜡宝,康琳,陈健,等. 超导纳米线单光子探测器[J]. 物理学报, 2011,60(3):038501. (ZHANG Labao,KANG Lin,CHEN Jian,et al. Superconducting nanowire single photon-detector[J]. Acta Physica Sinica, 2011,60(3):038501.)
- [7] MATTIOLI F,LEONI R,GAGGERO A,et al. Electrical characterization of superconducting single-photon detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2007,101(5):054302-054302-5.
- [8] 尤立星. 超导纳米线单光子探测技术进展[J]. 中国科学, 2014,44(3):370-388. (YOU Lixing. The development of technology for superconducting nanowire single photon-detector [J]. Science China, 2014,44(3):370-388.)
- [9] 巫君杰,尤立星,刘登宽,等. 超导纳米线单光子探测器动态电感研究[J]. 低温与超导, 2012,40(1):18-21. (WU Junjie, YOU Lixing,LIU Dengkuan,et al. Investigation of kinetic inductance of superconducting nanowire single-photon detector[J]. Cryo. & Supercond, 2012,40(1):18-21.)
- [10] 魏竹,张翠翠,王建忠. 噪声系数测量中的温度修正方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):736-739. (WEI Zhu,ZHANG Cuicui,WANG Jianzhong. Temperature correction methods for noise figure measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):736-739.)

作者简介:



康峰(1990-),男,安徽省淮南市人,在读硕士研究生,主要研究方向为电子系统设计和嵌入式软硬件、偏置电源的研究设计.email: 13210720029@fudan.edu.cn.

商慧亮(1978-),男,山东省烟台市人,博士,副教授,主要研究方向为自动控制及机器人、机器视觉、图匹配理论、中医信息化等。

孔庆生(1961-),男,上海市人,硕士,副教授,研究方向为电子系统设计、过程控制、视觉伺服等。

陈雄(1964-),男,福州市人,博士,教授,主要研究方向为控制理论与系统、移动机器人控制与运动规划、传感网络等。