

基于 STM32 离子注入机剂量检测控制器的设计

刘 辉, 谢明华, 王新辉, 周志英

(长沙大学 电子信息与电气工程学院, 长沙 410022)

摘要: 设计了一种基于 STM32F407 微处理器的离子注入机剂量检测控制器, 首先介绍了剂量控制器的整体设计和工作原理及如何实现离子束流精确检测、按设定的剂量均匀地注入到晶片表面, 然后对控制器的电流/电压变换、峰值检测、校准电流源、模/数转换等硬件电路设计和控制软件设计作了详细的介绍; 实验结果表明该控制器实现了大范围束流的快速量程切换, 量程切换时间达到 1 ms 以上, 束流测量精度小于 0.4%, 最小量程低至 2 μA , 测量漂移精度小于 0.3%, 该控制器结构简单, 工作稳定可靠, 有广泛的应用前景。

关键词: STM32 微控制器; 离子注入; 剂量检测与控制; 波形发生器

Design of Dose Detection Controller Based on STM32 Ion Implanter

Liu Hui, Xie Minghua, Wang Xinhui, Zhou Zhiying

(College of Electronic information & electrical engineering, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: This paper designs a dose detection controller for ion implanter based on STM32F407 Microprocessor. Firstly, it introduces the overall design and working principle of the dose detection controller and how to realize the accurate detection of ion beam current and uniformly inject ion dose into the wafer surface. Then it details hardware circuit design and control software design for current/voltage conversion, peak detection, calibration current source, analog/digital conversion of controller. The experimental results show that the controller achieves fast range switching over a wide range of beams. The switching time is more than 1ms, the accuracy of beam measurement is less than 0.4%, the minimum range is as low as 2 μA , and the measurement drift accuracy is less than 0.3%. The controller has simple structure, stable and reliable operation, and has broad application prospects.

Keywords: STM32 microcontroller; ion implant; dose detection and control; waveform generator

0 引言

离子注入是半导体芯片制造的掺杂工艺, 离子注入均匀性指标是衡量注入工艺质量的重要参数。离子注入机剂量均匀性控制技术是离子注入机的关键技术之一, 必须采取基于各种控制与测量方法和装置将离子按设定的剂量均匀、精确地注入到整个晶片表面^[1]。

剂量检测控制器的主要功能是精确采集离子束流剂量, 并实时控制离子束扫描运动, 将离子按设定剂量均匀注入到晶片表面, 它的控制性能的优劣及可靠性, 直接影响整机的技术性能及指标^[2-3]。

离子注入技术中, 大面积均匀注入是必不可少的条件, 直接将离子束静态地注入到晶片表面是不行的, 首先离子束横截面的束流密度分布存在不均匀性, 另外离子束能量集中于晶片表面的固定区域时, 会引起晶片表面温度过高, 造成晶片损伤。因此, 必须用离子束循环扫描的注入方式, 使离子束重复均匀扫描晶片表面, 以保证注入的均匀性^[4]。

根据离子注入机的束斑形状和注入扫描方式的不同,

剂量测量与控制方式也不一样, 离子束有斑状束和带状束, 斑状束须通过二维扫描运动才能将离子植入到整个晶片表面, 离子注入设备常用以下三种二维扫描方式。

1) 电子式扫描: 离子束进行扫描, 晶片固定, 离子束通过一套加了特定电压的水平扫描(X方向)和垂直扫描(Y方向)电极, 使离子束发生偏转, 实现离子束在X-Y两个方向上的来回扫描, 使离子束能均匀地扫描整个晶片。由于电子式扫描简单、有效, 因此应用广泛^[4]。

2) 机械式扫描: 固定离子束, 晶片在旋转电机和步进电机带动下机械扫描。

3) 混合式扫描: 离子束进行水平方向电子扫描, 晶片在直线电机的带动下作与电子扫描垂直方向的运动。

本文设计了一种适用于电子式扫描的离子注入机剂量控制器, 经测试表明, 可以实现注入剂量的高精度检测, 使整块晶片上的注入剂量均匀性得到控制, 效果良好。

1 系统结构及原理

本设计以 STM32 单片机作为主控芯片, 由闭环法拉第杯、信号调理电路、精密电流/电压(I/V)变换电路、峰值检测电路、滤波电路、积分电路、模/数(A/D)转换电路、通信接口电路、自校准电流源电路、扫描波形发生电路、高压电放大电路和液晶显示电路组成, 系统电路方框图如图 1 所示。

闭环法拉第杯用以捕获进入其中的所有电荷, 测量注

收稿日期: 2019-03-02; 修回日期: 2019-04-23。

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A377); 长沙市科技计划研发重点项目(K1705006)。

作者简介: 刘 辉(1968-), 男, 湖南双峰人, 教授, 工学硕士, 主要从事智能控制技术应用方向的研究。

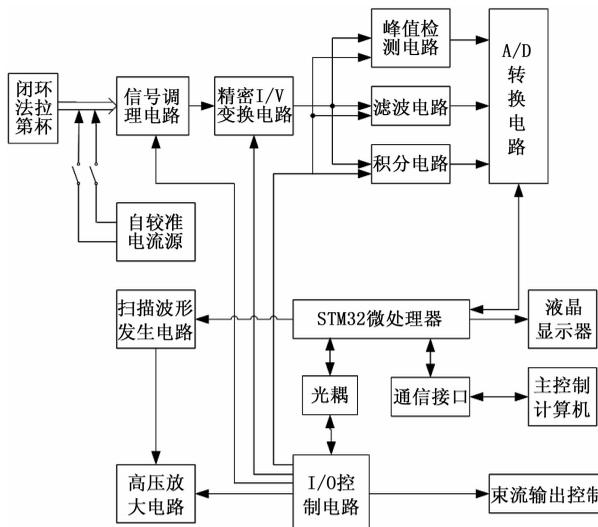


图 1 系统电路方框图

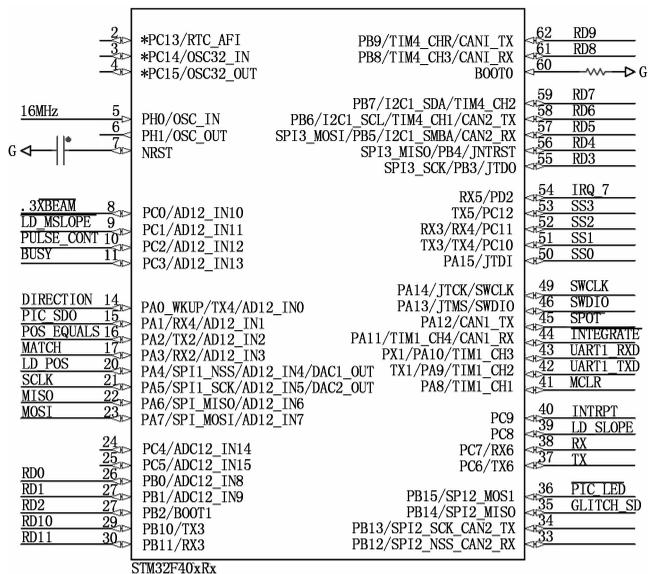


图 2 主控制器硬件连接图

入晶片上的离子束流; 信号调理电路将法拉第杯获得的离子束流放大, 多通道精密 I/V 变换电路将离子束流转换成 0~10 V 的电压; 积分电路用于测量给定时间内注入的离子剂量, 积分控制信号由微处理器输出, 当离子束流到达闭环法拉第杯时, 积分控制信号变为低电平时, 选通束流输入端, 触发积分电路开始束流积分, 当束流扫过闭环法拉第杯后, 积分控制信号变为高电平, 束流积分结束, 启动 A/D 转换电路, A/D 转换完成后产生中断请求, 微处理器读入转换结果, 计算出离子束流电流值。峰值检测电路完成一段时间内束流峰值的检测, 主要用于选择合适的测量档位。滤波电路完成离子实时注入剂量检测。微处理器根据这三种检测结果, 控制外部束流的输出量, 实现对离子注入剂量的精确控制。

扫描波形发生电路产生 X 轴和 Y 轴两路扫描信号, 经过高压放大电路输出扫描电压, 实现离子束在 X-Y 两个方向上的来回扫描, 使离子束能均匀地扫描整个晶片。

2 系统硬件设计

2.1 主控模块设计

主控模块控制核心芯片选用基于 ARM Cortex-M4 的 STM32F407, 其主频为 168 MHz, 具有片上 1MB Flash、112KB SRAM, 集成了单周期 DSP 指令和 FPU (floating point unit, 浮点单元), 提升了计算能力和代码的执行效率, 内部集成更加丰富的外设接口, 自带 2 个 CAN 控制器, 支持 CAN 协议 2.0A 和 2.0B 主动模式, 波特率最高可达 1 Mbit/s^[5], 完全符合剂量控制器所需要的采集和运算速度, 它的主要任务是计算扫描电压波形数据、运行控制程序、通过串行通信口接收主控计算机指令和发送数据给主控计算机等, 如图 2 所示是主控制器硬件连接图。

处理器外接 16M 的晶振, 通过内部 PLL 锁相环倍频到 48M 的系统工作频率。PC6 和 PC7 作为串口外部通信, 其它主要的引脚功能如下:

- PIC_LED: 为处理器的运行指示 LED 灯;
- LD_MSLOPE: 为 X 方向扫描斜率控制 DAC 加载控制信号;
- PULSE_CONT: 为脉冲基准标定信号控制引脚, 控制基准电路产生一个指定准确脉冲的信号, 通过积分电路进行积分并测量, 计算校准, 确保积分的准确性。
- BUSY: 为系统忙信号输出引脚, 高电平时表示系统正忙;
- 3XBEAM: 为 0.5 倍束流输入信号, 处理器通过快速检测输入束流信号选择合适的输入范围;
- DIRECTION: 为扫描波方向控制输出信号;
- INTEGRATE: 为 ADC 采集积分控制同步信号;
- RD0—RD7: 为 DAC 数据的低 8 位;
- RD8—RB11: 为 DAC 数据的高 4 位;
- POS_EQUALS: 为光纤通信输入信号;
- MATCH: 为生成扫描信号极性检测;
- LD_POS: 为点位置信号控制 DAC 数据加载信号输出;
- LD_SLOPE: 为扫描信号生成斜率控制 DAC 加载信号输出;
- INTRPT: 为外部中断请求信号输入;
- MCLR: 为外控制复位信号输入;
- SCLK, MOSI, MISO, SS0, SS1, SS2, SS3: 为控制器电路板上其他各器件 SPI 通信引脚;
- RX, TX: 为串口通信引脚。

2.2 精密 I/V 变换电路设计

精密 I/V 变换电路原理图如图 3 所示, 为了提高测量精度, 分为 6 个档位, 分别是 200 nA 档、2 uA 档、20 uA 档、200 uA 档、2 mA 档和 20 mA 档, 由一个精密高速运算放大器 OPA627, 6 个高速继电器和 6 个不同阻值的万分之一精密电阻组成, 由微处理器根据模拟通道中的输入

电流大小控制继电器自动切换档位, 将输入电流高速切换到 6 个不同阻值支路, 控制输出电压的大小在一个合适的区域值, 快速实现多档位束流精确采集功能, 图中 RV1 和 RV2 为调零电位器。

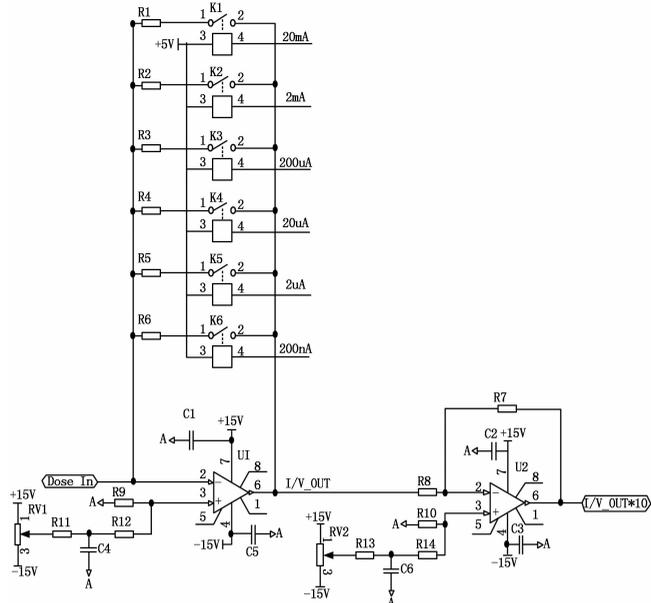


图 3 精密 I/V 变换电路原理图

2.3 峰值检测电路设计

图 4 是峰值检测电路原理图, 主要检测一段时间内束流的峰值, 用于合适的测量档位选择。由精密高速运放 OPA627、一个极低漏电流场效应管 Q1 用作充电二极管、极低漏电流的精密电容 CP1、放电电阻 R15 和模拟开关构成, 实现准确而快速的检测峰值电压。每次检测峰值电压前, 通过闭合模拟开关, 将电容通过 R15 对地完成放电。

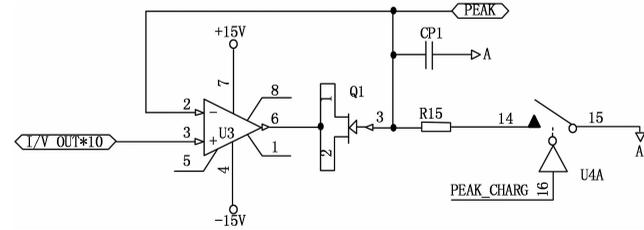


图 4 峰值检测电路原理图

2.4 积分电路设计

积分电路用于测量给定时间内束流离子的剂量, 其电路原理如图 5 所示。主要包括束流信号输入 V_{in} 、积分信号使能、积分放电控制和积分信号输出电路等。当积分信号使能端为低电平时, 选通束流 V_{in} 输入端, 同时将积分放电端悬空, 启动束流积分功能。当积分信号使能端变为高电平时, 束流积分结束, 积分输出电压 V_{out} 可通过 A/D 电路进行读取, 同时积分放电电路导通, 积分电压信号泄放。

2.5 自校准电流源电路设计

图 6 自校准精密电流源电路原理图, 由精密基准电压芯片 REF102BP, 4 个万分之一的高精密电阻、精密运放

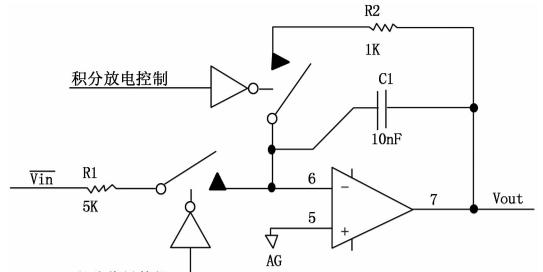


图 5 积分电路原理图

OPA627, 模拟开关和继电器构成。REF102 是高精度 10 V 电压基准集成电路芯片, 其温漂在工业温度范围内低至 2.5 ppm/C, 具有功耗低、升温快、稳定性好、噪声低等优点^[6]。REF102 的输出电压几乎不随供电电源电压及负载变化, 通过调整外接电阻, 输出电压的稳定性及温度漂移可降到最小。图中 REF102BP 产生 10 V 的基准电压, 通过 R17 和 R18 分压后经 OPA627 缓冲后获得 9.000 V 的基准电压, 模拟开关控制基准输出产生准确的脉冲信号。微处理器控制继电器的切换, 实现注入离子束流自检和自校准。

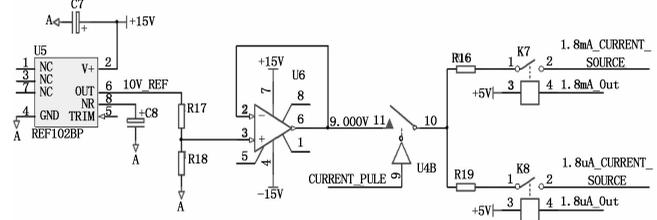


图 6 自校准精密电流源电路原理图

2.6 A/D 采集电路设计

本设计要求快速准确采集各路模拟信号, 不需要连续采集, 只需要采集瞬间值, 如峰值检测电路, 在一个扫描周期内, 需要准确采集在充电电容放电前的最大值。在一个扫描周期内进行剂量积分检测时, 积分压值代表了束流的大小, 快速准确采集积分电压很重要。

A/D 转换电路连接电路如图 7 示, AD977ABN 为 ADI 公司的 16 位、200 kSPS 的 A/D 转换芯片, 具有最大无极性 0~10 V, 有极性 ± 10 V 的输入范围和其它可选的小范围输入配置^[7], 本设计配置成 0~10 V 输入范围。AD977ABN 具有高达 96 dB 的动态范围, 同时自带 2.500 V 精度基准, 很适合在本设计中宽范围输入应用。

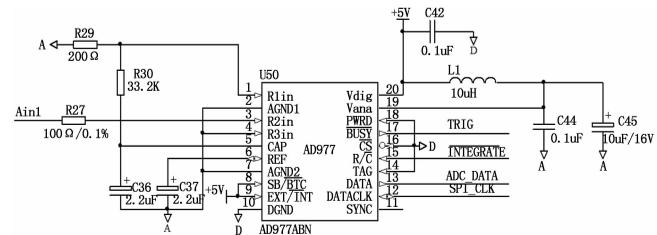


图 7 A/D 转换电路连接电路图

图中 A_{in1} 为 0~10 V 的输入信号, 前级通过模拟开关

将不同的信号切换输入;

SPI_CLK 为 MCU 读取转换数据的时钟输入信号;

ADC_DATA 为 MCU 读取转换数据的数据输出信号;

INTEGRATE 为转换触发输入信号;

TRIG 为转换中忙信号, 低电平表示忙, 转换中, 高电平表示转换完成, 此时可触发下一次转换。

2.7 扫描波形发生电路

波形发生电路由微处理器、FPGA、即 X/Y 向两路高速 DAC 转换电路、两路滤波电路、两路缓冲放大电路和高压放大电路组成, 包含 X 向扫描发生器和 Y 向扫描发生器, 经离子束的初始轨迹注入在晶片的中心位置处, 波形发生器产生 X/Y 向二维扫描, 同步控制离子束偏离初始轨迹, 使之打在晶片的其它区域, 从而在晶片的整个表面上均匀注入离子。

微处理器接收主控计算机的控制命令, 完成与主控机的数据通信、键盘等外部接口电路的设计, 对 FPGA 进行操作, 完成控制波形电压数据的更新。FPGA 采用 Cyclone III 的 EP3C16Q240C8N, 利用其内部的 RAM 存储波形数据, 每一点波形数据由 4 个字节组成, 其中有两个字节为电压值, 另外两个字节为此点电压对应的斜率值, 由 X/Y 向校准算法修正各点的扫描电压斜率值, 实现扫描速度随着水平方向各位置点对应的束流大小成比例调节, 保证每次扫描注入离子在水平向分布的均匀性。扫描波形输出通过程序控制, 当启动波形输出时, FPGA 会从 RAM 中实时地读出电压坐标和斜率坐标送到高速 DAC、转换电压送入滤波电路滤掉高频噪声, 经过缓冲放大电路后、再经过高压放大电路产生给定的斜率输出扫描电压, 当输出电压到达给定电压时, 向微处理器发出信号, 微处理器告之 FPGA 将下一组波形数据送到上述执行电路。

3 系统程序设计

剂量检测控制器主要完成检测离子束流、计量晶片注入剂量、扫描电压波形控制、束流输出控制, 主控计算机与剂量控制器实时数据交互, 并负责整机的全自动控制, 数据显示与处理。系统控制程序需要处理的数据量大, 控制点多, 控制过程复杂, 采用分层结构化的框架式结构设计来提高软件的编写效率, 降低复杂度, 同时提高软件系统的健壮性、可读性和可维护性。

3.1 主功能程序

根据系统控制和时序要求, 构建一个如图 8 所示的主框架程序。主框架程序在系统初始化完后, 循环调用 1 ms 周期用户程序, 10 ms 周期用户程序, 100 ms 周期用户程序和剂量检测、计算、显示和控制等其它功能程序。

3.2 中断程序设计

系统中断程序分为外部中断, 串口通信中断, 100 μ s 定时中断, 1 ms 定时中断和 10 ms 定时中断, 根据系统的控制要求在中断程序中调用相应的功能模块。外部中断为 A/D 采集电路在数据采集转换完成后, 通知微处理器读取数据。

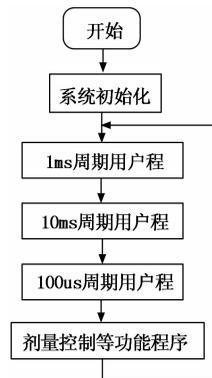


图 8 主框架程序工作进程流程

100 μ s 中断具有最高优先级, 用于定时要求严格的功能模块, 如产生精确的 AD 采集触发脉冲, 从时间上保证系统的准确性。

1 ms 中断具有第二优先级, 用于控制波形输出的幅度, 通信协议定时和定时计数等。

串口通信中断程序仅进行数据接收的发送, 协议处理在主框架程序内调用处理完成。

10 ms 中断用于处理输入输出扫描, 辅助功能处理, 如长时间定时计数。

3.3 通信程序设计

本控制器集成了 Modbus 通信协议, 方便与主控计算机和工业 HMI (Human Machine Interface) 人机界面接口通信。通信协议包含串口初始化函数, 收发中断函数, 接收数据协议处理函数和协议时间处理函数等多个功能程序。

串口接收产生接收中断后, 清除中断标志, 调用数据读取处理程序, 然后更新协议时间, 最后退出中断, 直到下一次中断进入。串口发送产生发送空中断后, 清除中断标志, 立即准备下一个数据发的发送, 如果发送完成, 则关闭中断, 不发送数据退出, 直到下一次触发中断发送数据。

Modbus 的数据通信结束是基于协议时间来判别的, 当大于 3 个字节通信时间内没有收到数据表示通信完成, 协议时间清零, 关接收中断, 置位接收完成标志。考虑到通信协议处理不需要过高的响应时间, 响应时间为几个毫秒, 同时协议处理时间在 300 μ s 以内, 将协议处理程序放入用户 1 ms 周期内调用, 不影响通信响应的同时只占用较的 CPU 处理时间。

3.4 注入剂量控制程序设计

在电子式扫描中, 离子束的高速扫描可以产生足够多的重复图形, 使不完整图形带来的不均匀性限制在所希望的范围内^[5]。因此, 电子式扫描在满足线性要求的条件下, 一般只监控注入剂量, 就可以达到要求的均匀性。剂量控制器是整个系统的指挥和协调中心, 主要任务是根据设定的离子注入剂量计算出扫描次数, 在注入过程中, 实时采集扫描过程的相关数据, 对剂量进行实时监控, 控制每次扫描波形周期, 注入剂量等于设定值, 就会自动关闭束闸, 停止注入。程序流程如图 9 所示。

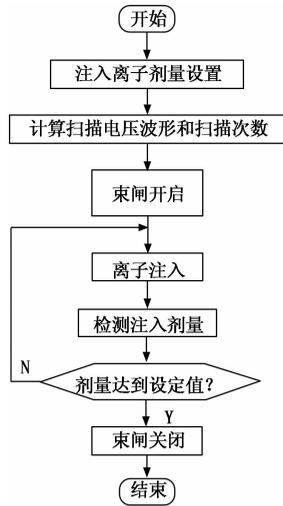


图 9 注入剂量控制程序流程图

表 2 温度漂移测量实验数据

档位	输入电流	增益	漂移范围值	精度/(%)
20 mA	18.000 mA	1	0.023 mA	0.13
2 mA	1.800 mA	1	0.0016 mA	0.09
200 μ A	180.00 μ A	1	0.13 μ A	0.07
20 μ A	18.000 μ A	1	0.019 μ A	0.11
2 μ A	1.800 μ A	1	0.005 μ A	0.27

检测控制器，介绍了系统结构及硬软件设计过程。该控制器首先通过主控制计算机设置晶片需要注入的离子剂量，利用法拉杯测量注入的离子束流，通过电流/电压变换电路、剂量积分电路、峰值检测电路和微处理器测量实时计算注入的离子剂量值，通过波形发生电路产生 X/Y 向二维电扫描，改变 X 轴和 Y 轴的扫描电场，控制离子束作二维运动，将离子束按设定的剂量值，均匀注射离子到晶片表面。测试结果表明：该控制器功能实现了预期的设计功能，具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 杨建生. LC-11 型强流离子注入机剂量控制器 [J]. 微细加工技术, 1997 (4): 12-17.

[2] 钟新华, 袁卫华. 基于 NI Compact RIO 的离子注入机剂量控制系统设计 [J]. 工业控制计算机. 2016, 29 (1): 4-6.

[3] 钟新华, 彭立波, 易文杰. 离子注入机剂量控制器设计 [J]. 自动化博览, 2016 (10): 92-95.

[4] 林义鹏. 离子注入机均匀性的改进设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[5] 杨洁, 廖俊杰, 谷肖飞, 等. 基于 STM32F407 _ BQ76PL536 的电池管理系统设计 [J]. 电源技术, 2018, 42 (11): 1640-1641.

[6] 施自胜, 梁齐飞. 高精度电压基准 REF102 及其应用 [J]. 世界电子元器件, 2014 (2): 28-29.

[7] 谢宏, 金曼, 夏斌. AD977A 在脑电信号采集系统中的应用 [J]. 电子设计工程, 2009, 17 (6): 81-82.

4 测试结果

该剂量检测控制器成功研制出了样机，并对样机的束流采集精度、温度漂移范围、继电器换档切换时间等主要性能指标进行了测试。控制器实现了大范围束流的快速量程切换，量程切换时间达到 1 ms；束流测量精度小于 0.4%，最小量程低至 2 μ A；测量漂移精度小于 0.3%。用自校准电流源模拟注入晶片的离子束流，束流精度和温度漂移测试结果分别如表 1、表 2。

表 1 束流精度测量实验数据

档位	输入电流	增益	测量值	精度/(%)
20 mA	18.000 mA	1	18.032 mA	0.17
2 mA	1.800 mA	1	1.8019 mA	0.11
200 μ A	180.00 μ A	1	180.15 μ A	0.08
20 μ A	18.000 μ A	1	18.027 μ A	0.15
2 μ A	1.800 μ A	1	1.806 μ A	0.33

5 结束语

本文设计了一种基于 STM32 单片机的离子注入机剂量

(上接第 79 页)

参考文献:

[1] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. 步进电机控制系统建模及加减速曲线优化 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (1): 37-42.

[2] 王燕东, 彭明莎, 李伟. 嵌入式系统的多路步进电机控制系统的设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, 16 (3): 67-69.

[3] 马文斌, 杨延竹, 洪运. 步进电机控制系统的设计及应用 [J]. 电子技术应用, 2015, 41 (11): 11-13.

[4] 朱明辉, 赵信广, 尤星懿. 基于 FreeRTOS 和 MQTT 的海洋监测网络框架 [J]. 电子技术应用, 2018, 44 (1): 41-44.

[5] 樊留强, 惠延波, 王莉. 步进电机加减速控制新方法的研究 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44 (3): 36-39.

[6] 王粟, 张威亚. 采用 S 型控制算法的步进电机控制器 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (4): 406-410.

[7] 郭庆, 郭银峰, 徐翠峰. 基于 DSP 的步进电机 S 曲线加减速控制 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2018, 38 (1): 41-44.

[8] 罗兵, 黄万杰, 杨帅. 基于 Tan-Sigmoid 函数参数调整的 BP 神经网络改进算法 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2006 (1): 150-153+158.

[9] Zhang L, et al. Research on stepper motor motion control based on MCU [A]. 2017 Chinese Automation Congress (CAC) [C]. Jinan, 2017, 3122-3125.

[10] Yang H, Zhang Y, Ding W, et al. On 5 stage S-type acceleration/deceleration control model based on improved genetic algorithm [A]. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC) [C]. Chengdu, 2016, 4448-4452.

[11] 段伊竹. 基于 PyQt 的分布式即时富集通讯系统的设计与实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.