

doi: 10.7690/bgzdh.2020.06.010

腕式 X- γ 个人剂量计

孙 仪, 陈志文, 庞博文, 曾俊钢
(陆军装备部某军事代表局, 北京 100089)

摘要: 为满足超长待机及狭小空间的需要, 设计一种腕式 X- γ 个人剂量计研制方案。根据 X- γ 射线入射到半导体探测器的工作原理, 选用半导体探测器进行探测, 采用软封装表用超低功耗单片机完成硬件设计, 通过 FLUKE 17B+型万用表对腕式个人剂量计的功耗进行测试。实验结果表明: 该个人剂量计的剂量当量率相对固有误差小于 $\pm 20\%$, 能量响应误差小于 $\pm 25\%$, 能够保护涉核人员避免过量核辐射伤害, 并满足剂量管理的需求。

关键词: 腕式 X- γ 个人剂量计; 半导体探测器; 超低功耗单片机; 能量补偿

中图分类号: TL822 **文献标志码:** A

Wrist X- γ Personal Dosimeter

Sun Yi, Chen Zhiwen, Pang Bowen, Zeng Jungang

(PLA Military Representative Bureau of Army Equipment Department, Beijing 100089, China)

Abstract: To satisfy the needs of ultra-long standby and narrow space, a plan of wrist X- γ personal dosimeter was designed. According to the principle of the X- γ radiation incident on the semiconductor, the semiconductor detector is selected for detection, and the hardware design is completed with an ultra-low power MCU using a soft sealed package, to test the power consumption of the personal dosimeter by FLUKE 17B+ multimeter. The tests shows the maxim dose rate error is no more than $\pm 20\%$ and the maxim energy response error is no more than 25%. It can protect nuclear-related personnel avoid radiation injury and meet the requirements for dose management.

Keywords: wrist X- γ personal dosimeter; semiconductor detector; ultra-low power MCU; energy compensation

0 引言

个人剂量计被广泛应用于核电站、核废料处理厂、医院放射性科室及其他涉核场所, 为涉核人员提供实时受照剂量信息。当剂量当量率或剂量当量超过阈值时发出报警, 提示人员已进入高辐射区域, 避免涉核人员受到过量核辐射伤害。管理机构可通过剂量计读出仪读取人员在工作期间所受到的剂量当量, 进行必要的剂量管理。

国内的个人剂量计多设计为佩戴式, 将 GM 管作为常用的个人剂量计探测器。GM 管工作时需要使用高压电路提供 400~500 V 的高压, 体积较大, 有的仪器功耗高达 20 mA^[1-3]。半导体探测器因其体积小、量程范围宽, 近年来开始在国内研制的个人剂量计中使用, 但需研制能量补偿材料, 解决能量响应问题^[4-5]。

笔者设计一种体积与手表相当的腕式个人剂量计。腕式个人剂量计对电子学体积和系统功耗有较高要求, 采用 13 mm² 半导体探测器, 在 +3 V 偏压下即可工作; 采用表用超低功耗单片机作为主控单元, 在 1 MHz 主频下功耗相比 MSP430 系列单片机

功耗降低约 10 倍, 且价格优于同等功能的 MSP430 单片机; 采用一体化红外收发芯片模块, 静态时几乎无功耗。以上措施减小了电子学体积, 降低了系统功耗, 有效延长了电池的使用时间。

1 仪器概述

1.1 半导体探测器

半导体探测器具有低结电容、低暗电流、高速光电响应, 抗辐射性能好、体积小、封装简单等特点。其最大优点是: 工作电压低, 无需在全耗尽条件下即可正常工作; 测量量程宽, 可避免高剂量率时的测量阻塞。笔者研制的其他设备实验结果表明: 在脉冲计数形式下, 13 mm² 半导体探测器最高量程可达到 15 Sv/h。考虑仪器过载特性, 腕式个人剂量计最高剂量当量率可达到 1.5 Sv/h。半导体探测器的上述特点对增加仪器的可靠性, 降低仪器功耗, 优化功能设计都大为有利^[6]。

1.2 能量响应补偿

半导体探测器对 50~250 keV 能量的射线响应灵敏度较高, 而 250 keV 以上能量射线可以穿透探

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-12

作者简介: 孙 仪(1972—), 男, 江苏人, 学士, 高级工程师, 从事防化装备质量监督研究。E-mail: 1670512764@qq.com。

测器，能量沉积较少，响应灵敏度相对较低；因此，需要使用铜、铅、锡等材料组成的能量补偿合金片置于半导体探测器灵敏面积上方，阻挡低能射线，降低其灵敏度。能量补偿合金片对大于 250 keV 能量的射线几乎无影响，从而满足能量响应的要求^[7]。

1.3 仪器工作原理

X-γ 射线入射到半导体探测器的灵敏体积内，产生电子-空穴对，在外电场的作用下分别向两电极漂移，从而在电极上感应出电荷^[8]。感应电荷经过脉冲成形电路处理，转换为计数脉冲，送入单片机 I/O 口完成脉冲计数、剂量当量率和剂量当量的计算。当剂量当量率和剂量当量超过设定的预警阈值、报警阈值或工作时间阈值时，仪器发出声光报警，并在显示屏上闪烁报警图标，提示工作人员已进入高辐射区域或已达到工作时间。仪器在工作时间内将测得的最高剂量当量率和剂量当量信息存储于单片机的 ROM 中，通过红外上报至剂量计读出仪，实施剂量管理。

腕式个人剂量计基本指标：

1) 能量响应范围：50 keV~3 MeV，误差小于等于±30%；

2) 剂量当量率范围：0.1 μSv/h~1 Sv/h；

3) 剂量当量范围：0.1 μSv~1 Sv；

4) 相对固有误差：

剂量当量率：0.1 μSv/h~1 Sv/h，小于等于±30%；

剂量当量：测量范围内小于等于±30%；

5) 工作时间：大于 1 000 h；

6) 物理尺寸：不大于 φ47 mm×25 mm。

2 仪器硬件设计

如图 1 所示，腕式个人剂量计由探测器及模拟

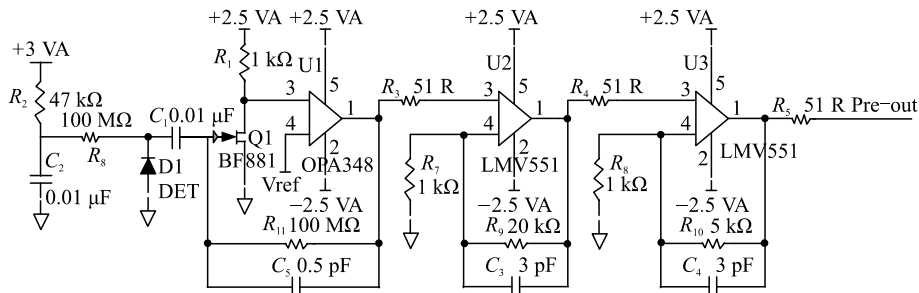


图 2 电荷灵敏前放和线性放大部分电路原理简图

3 仪器软件设计

个人剂量计上电后，软件完成上电自检、核脉冲信号处理及存储、液晶显示、电源管理、按键响

电路、超低功耗单片机及外设和电源组成。

2.1 模拟电路

模拟电路模块由半导体探测器和脉冲成形电路组成。脉冲成形电路包括电荷灵敏前放、线性放大器和比较器 3 个部分。

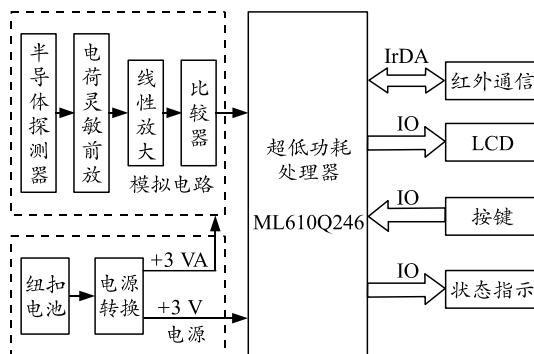


图 1 腕式个人剂量计组成

半导体探测器采用成都晶威公司 13 mm² 的 JW-S3.6，其漏电流为 fA 级，线性放大后信号噪声小于 15 mV。半导体探测器输出的电流脉冲信号通过交流耦合送入电荷灵敏前放。为更好地抑制噪声，在电荷灵敏前放输入端加入一个 N 沟道 JEFT 型 MOS 管，以增加输入阻抗。电荷灵敏前放搜集感应电荷并转换成电压信号，经过线性放大后送入低功耗比较器，转换为计数脉冲。相比文献^[4]，因仪器体积和功耗限制，对模拟电路部分做了较大改进。采用 TI 公司 OPA34x 系列和 LMV 系列低功耗、SC70 封装运放，有效降低了功耗和电子学体积。模拟电路部分功耗降低至 200 μA 以下。采用低功耗运放牺牲了部分带宽，造成输出脉冲上升沿不够陡峭，输出脉冲呈高斯形状，但不影响计数。探测器及模拟电路对光和噪声敏感，整体置于金属屏蔽罩内进行电磁屏蔽。电荷灵敏前放和线性放大部分电路原理如图 2 所示。

应、报警控制和红外通信控制等。核脉冲信号处理包括对模拟电路输出的脉冲进行计数、麦克风效应剔除、剂量当量率和剂量当量计算等。其架构如图

3 所示。

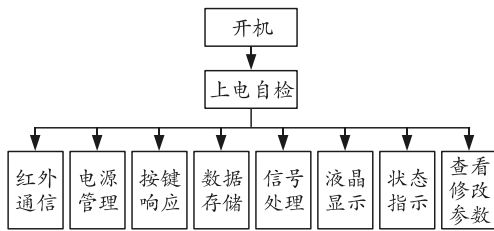


图 3 软件模块构架

4 实验测试

4.1 仪器功耗测试

采用 FLUKE 17B+型万用表对腕式个人剂量计的功耗进行测试，测试结果如表 1 所示。

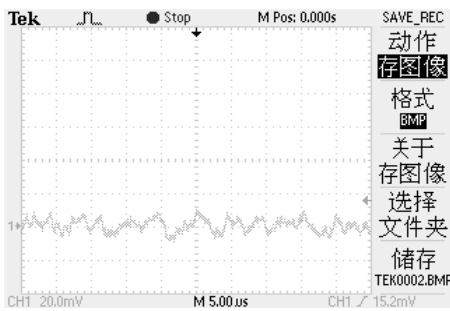
表 1 仪器功耗 μA

工作状态	工作电流
关机	2
测量	450
报警	20 000

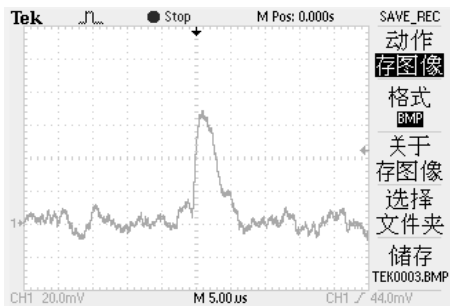
测试结果表明：3032 纽扣电池 3 V/550 mAh 在测量状态下，连续工作时间大于 1 200 h。考虑电池电量下降后，主电源芯片进入升压状态，工作电流稍有增加，但增量小于 100 μA ；因此，腕式个人剂量计的实际工作时间仍然大于 1 000 h，满足指标要求。

4.2 模拟电路噪声及功能测试

使用示波器观察本底噪声和放置 ^{241}Am 源时，模拟电路模块输出的信号如图 4 所示。



(a) 本底噪声输出波形



(b) ^{241}Am 输出波形

图 4 模拟电路模块输出信号

测量结果显示，本底状态下，模拟电路输出噪声幅度小于 15 mV；放置 ^{241}Am 源时模拟电路输出信号类似高斯形，幅度约为 60 mV，脉宽约 5 μs 。

4.3 能量响应实验

在某国防二级辐射计量站进行了能响实验。使用 X 光机发射不同能量的 X 射线，记录腕式个人剂量计测量值，对 ^{137}Cs 测量值进行归一。实验数据如表 2 所示。

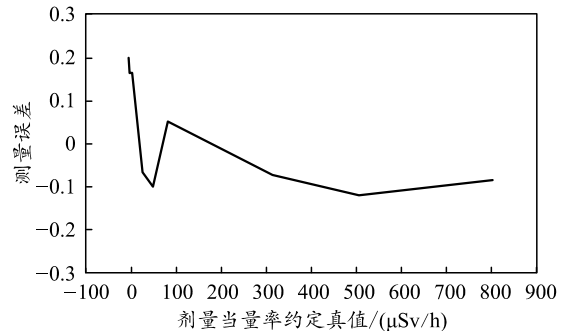
表 2 能量响应实验

能量/keV	剂量当量率 约定真值/(mSv/h)	响应	归一响应
53	3.02	80.85	0.88
65	2.97	113.60	1.23
84	2.94	114.97	1.25
101	2.99	93.48	1.01
111	2.94	81.73	0.89
165	2.97	88.41	0.96
206	2.97	106.80	1.16
662	2.99	92.11	1.00
1 250	3.03	71.86	0.78

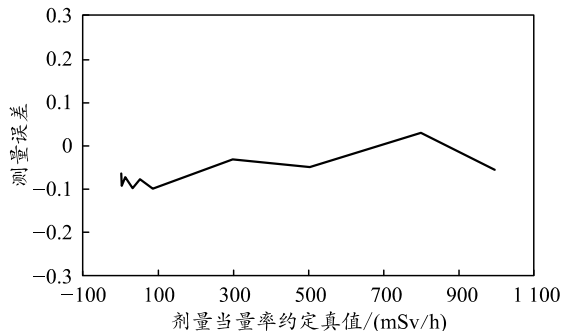
实验结果表明：腕式个人剂量计最大能量响应误差出现在 84 keV，误差为 25%，满足指标要求。

4.4 相对固有误差实验

按照每 10 倍量程，在 30%、50%和 80%附近选取测量点的原则，在某国防二级辐射计量站使用 ^{137}Cs 放射源进行剂量当量率相对固有误差实验。误差曲线如图 5 所示。



(a) 低剂量当量率测量误差分析



(b) 高剂量当量率测量误差分析

图 5 误差曲线

与应用[J]. 建筑学报, 2012(4): 27-30.

[4] 沈运柱. 浅论建筑模数与模数协调[J]. 北京建筑工程学院学报, 1995, 11(1): 29-39.

[5] 刘彬, 古平, 刘一川, 等. 新型装备模块化概念设计方法[J]. 兵工自动化, 2015, 34(2): 46-48.

[6] 赵欣, 王运斗, 张晓峰, 等. 模块化理论及其在我国卫生装备领域的应用[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(11): 102-104.

[7] 刘辉, 阮拥军. 装备保障力量模块化设计构想[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(9): 35-36, 42.

[8] 后勤工程学院. 军用油料包装规范: GJB 4131A—2012[S]. 北京: 总后后勤科学研究所, 2012.

[9] U.S Military. MIL-STD-290H Packaging and Marking of Petroleum Related Products Department of Defense Standard Practice[S]. America: U.S Military Specs/Standards/Handbooks, 1991.

[10] U.S Military. PPP-C-96E Cans, Metal, 28Gage and Lighter[S]. America: U.S Military Specs/Standards/Handbooks, 1992.

[11] U.S Military. PPP-P-704E Pails, Metal: (Shipping, Steel, 1 through 12 Gallon)[S]. America: U.S Military

Specs/Standards/Handbooks, 1981.

[12] U.S Military. PPP-D-729E Drums, Shipping and Storage: Steel, 55 Gallon(208 Liters)[S]. America: U.S Military Specs/Standards/Handbooks, 1977.

[13] U.S Military. PPP-D-723J Drums, Fiber[S]. America: U.S Military Specs/Standards/Handbooks, 1993.

[14] U.S Military. PPP-D-705E Drums, Shipping and Storage: Steel, 16 and 30 Gallon Capacity[S]. America: U.S Military Specs/Standards/Handbooks, 1994.

[15] 武小琴, 朱霞, 姚晓玲, 等. 美军地面装备附属油料包装容器规格分析及启示[J]. 包装工程, 2014, 35(21): 145-149.

[16] 陶学强, 伍瑞昌, 郭立军, 等. 机动医疗分队卫生装备模块化集装研究[J]. 医疗卫生装备, 2015, 36(4): 22-24.

[17] 总后后勤科学研究所. 军用物资直方体运输包装尺寸系列: GJB 182B—2013[S]. 北京: 总后后勤科学研究所, 2013.

[18] 总后建筑工程所. 军用平托盘基本尺寸和额定载重量: GJB 183A—1999[S]. 北京: 总后司令部, 1999.

[19] 刘焕松. 美军的战场油料包装[J]. 中国包装, 2001, 21(1): 61-64.

(上接第 44 页)

实验结果表明: 在低剂量段, 剂量当量率相对固有误差最大为 20%; 在高剂量段, 剂量当量率相对固有误差最大为 8.8%, 满足全量程误差要求。

5 结论

笔者选用体积小的半导体和超低功耗单片机, 完成了狭小空间设计, 优化了计量仪功耗, 采用 3032 纽扣电池供电, 连续工作时间大于 1 000 h。实验结果表明: 该腕式个人剂量计剂量当量率相对固有误差和能量响应满足设计要求, 并具有便于携带、直观易用、量程宽、线性度较好等特点, 对预防、控制和减轻核辐射职业疾病的危害, 保护从事核辐射救援、核辐射环境工作人员的身心健康, 有着积极的作用。

参考文献:

[1] 张佳, 王成竹, 沈杨, 等. 低功耗便携式剂量率仪的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(2):

125-128.

[2] 杨中建, 屈明玥, 白召乐, 等. 光子辐射场直读式个人剂量当量仪研制[J]. 核电子学与探测技术, 2018, 38(2): 228-234.

[3] 李强, 度先国, 石睿, 等. 基于 MSP430 单片机的便携式 γ 个人剂量仪设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(1): 76-80.

[4] 胡颖睿, 梁卫平, 李京伦, 等. 一种基于半导体探测器和 NFC 的 X- γ 个人剂量计[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 32(7): 899-902.

[5] 姚永刚, 邓长明, 倪邦发, 等. 硅半导体探测器个人剂量仪的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(8): 1020-1023.

[6] 刘正山, 邓长明, 张志勇, 等. PIN 半导体探测器在个人剂量仪中的应用研究[J]. 核电子学与探测技术, 2005, 25(6): 661-663.

[7] 欧向明, 赵士菴, 丁艳秋, 半导体型个人剂量计能量补偿的研究[J]. 中国医学装备, 2015, 12(3): 4-6.

[8] 凌球, 郭兰英. 核辐射探测[M]. 北京: 原子能出版社, 1992: 152.