

基于 PIN 光电二极管的个人辐射探测器研制

钟华强^{1,2}, 骆志平¹, 刘森林¹, 张瑞焕², 巫果平²

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 广州兰泰胜辐射防护科技有限公司, 广东 广州 510665)

摘要:为使公众能自行探测所处环境的辐射水平, 本文利用 PIN 光电二极管直接测量 X/γ 射线的原理研制了便携式环境辐射探测系统, 该系统采用智能终端控制探测设备。其中, 探测模块中设计了弱信号放大电路, 控制和通信模块的设计基于无线微控制器。该环境辐射探测器具有低成本、低功耗、体积小、易使用、易组网等特点。经国防科技工业电离辐射一级计量站检定, 探测器各项指标均符合国家剂量仪鉴定规程 JJG 521—2006 的要求。

关键词:辐射探测器; PIN 光电二极管; 智能终端

中图分类号: TL814

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)02-0360-06

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0234

Development of Radiation Detector Based on PIN Photodiode

ZHONG Huaqiang^{1,2}, LUO Zhiping¹, LIU Senlin¹, ZHANG Ruihuan², WU Guoping²

(1. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2. Ration Co., Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract: To enable the public to monitor the environmental radiation levels independently, an environmental radiation detector was developed based on the principle of direct measurement of X/γ rays by PIN photodiode. The detection system was controlled by intelligent terminal. The weak signal amplifier circuit was designed in the detector module. And the control and communication modules were designed based on the microcontroller (MCU). The environmental radiation detector has the characteristics of low cost, low power consumption, small size, easy to use and easy networking. The characteristics of the system were tested in National Radiation Measurement Station, which are in accordance with the requirements of national standard JJG 521—2006.

Key words: radiation detector; PIN diode; intelligent terminal

一系列放射性事故使公众对辐射安全愈发关注, 但信息公开不足和公众宣传缺失导致公众对核能和核技术应用的认知存在偏差, 进而产生“恐核”心理, 对涉核项目的立项和建设进行抵制。减少和消除公众的核恐惧阴影是核能

及核技术发展的必经之路, 而公众了解自身所处环境的辐射水平将是当前消除公众对核恐惧心理、避免邻避效应、推进核能和核技术发展最为有效的办法之一^[1]。当前市面上的环境辐射探测器普遍体积较大、价格贵、操作复杂,

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-04-18

作者简介: 钟华强(1982—), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 辐射防护及环境保护专业

网络出版时间: 2019-07-23; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190723.1034.004.html>

不适合普通公众自行开展环境辐射探测,而现有的便携式辐射探测器又少有联网并分享数据的功能。随着半导体技术的发展,部分商用光电二极管的性能已能满足用于辐射探测的要求。为此,本文研制低成本、携带方便、实时监测的环境辐射探测器,用以满足公众自行探测周边环境辐射水平的需求,从而有效消除公众的恐核心理。

1 PIN 探测器

本文研制的探测器需满足体积小、成本低、易组网、稳定可靠等需求。探测系统的总体设计方案为基于廉价的商用 PIN 光电二极管器件研制便携式辐射探测器;基于智能终端通过无线通信的方式实现对探测器的控制。

1.1 PIN 探测 X/γ 射线的研究

在非核辐射测量方面,以光导模式工作的结型光伏型探测器称为光电二极管。光电二极管均具有 1 个 PN 结,在微弱、快速光信号探测方面有着重要的应用。在 P 区和 N 区之间引入本征层(I 层)可制成 PIN 光电二极管。本征层有低掺杂、高电阻的特性。引入本征层后, PIN 的耗尽层厚度增大,灵敏体积增大,对入射粒子或光子的能量沉积能力大幅增强。因此, PIN 可直接用于探测电离辐射。用于电离辐射探测时, PIN 光电二极管具有平均电离能低、能量分辨率高、脉冲上升时间短等优势;但同时也存在温度效应、辐照效应、信号输出小等劣势。其中,温度效应和辐照效应作为半导体器件固有特性,当前还没有较好的解决方案,但硅半导体器件的辐照效应并不明显^[2]。对于信号输出小的问题,一般均通过改变灵敏体积,提高探测效率来解决,但这样会增加探测器的噪声。PIN 探测器的噪声主要来自灵敏区内复合和俘获中心由于本征热激发产生的载流子形成的反向电流(复合电流)。该部分电流为 $I_{\text{复合}}$:

$$I_{\text{复合}} = \frac{qn_i s d}{2\tau} \quad (1)$$

式中: q 为灵敏体积内本征载流子数; n_i 为本征载流子浓度; τ 为少数载流子寿命; d 为灵敏区厚度; s 为灵敏区面积。

可见, $I_{\text{复合}}$ 与灵敏体积内本征载流子数呈

正比,而本征载流子数等于载流子浓度与灵敏体积的乘积。因此灵敏区厚度越大,面积越大,则反向电流越大,噪声越大^[3]。PIN 光电二极管的灵敏区是探测电离辐射的关键,灵敏区的体积变化将直接影响探测器的各项主要参数,包括反向电流、能量分辨、探测效率等。 γ 射线与 PIN 光电二极管灵敏区相互作用后的探测效率可由式(2)粗略计算得到。

$$\eta = 1 - N/N_0 = 1 - e^{-\mu d} \quad (2)$$

式中: η 为探测效率; N_0 和 N 分别为穿过灵敏区前、后的光子数; μ 为 X/γ 射线在该灵敏区中的衰减系数。但由于康普顿散射引起多重效应,改变了探测器输出信号,使得实际情况与理论计算有较大偏差。通过实验测量或蒙特卡罗(MC)法计算可得到探测器的探测效率。本文采用 MC 法研究了不同灵敏区厚度对不同能量的 γ 射线的探测效率。

1.2 探测器效率的数值分析

MC 法模拟计算采用 Geant4 软件包。为减少其他因素的影响,本文采用简化的计算模型(图 1)。图 1 中灰色部分为 PIN 探测器的耗尽层(即为灵敏区厚度),材料为单质硅。直线为入射 γ 光子路径,方向垂直于 PIN 探测器入射。

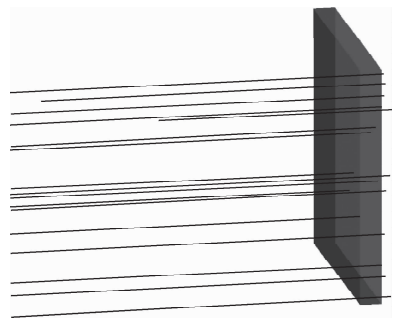


图 1 Geant4 模拟计算 PIN 探测 γ 辐射的模型

Fig. 1 Geometry structure of PIN detecting γ radiation by Geant4

γ 光子源面积与探测器大小相同,能量在 0.06~2 MeV 范围内选取。耗尽层厚度在商用晶圆厚度范围(30~1 000 μm)内选取。经模拟计算后,不同耗尽层厚度时探测效率随光子能量的变化如图 2 所示。

由图 2 可知,在 PIN 灵敏体积固定的情况下(探测器的入射面积和 I 层厚度固定),探测

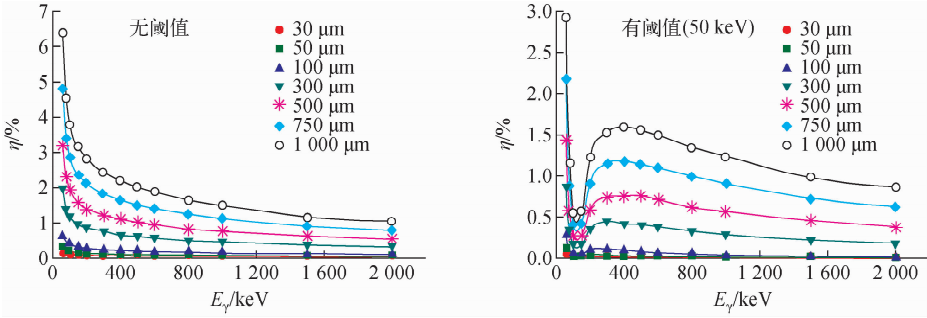


图2 不同耗尽层厚度时探测效率随光子能量的变化

Fig. 2 Detection efficiency vs photon energy at different intrinsic thicknesses

器的探测效率随入射光子能量的增大而减小。在光子能量较低时,因为光电吸收截面较大,探测效率显著高于其他能量。设定能量阈值后,不同能量射线探测效率下降的幅度并不一致,在100~200 keV的能量范围内,由于康普顿散射效应,数值计算结果出现峰谷低值。因此,为获得更好的能量响应和信噪比,PIN耗尽层厚度越大越好。但如果只是探测低能 γ 射线,则可选择较薄的耗尽层厚度,从而可消除高能射线和暗电流的影响。

2 硬件设计

本文首先选取合适的光电二极管作为探测射线的元件,然后根据选定的光电二极管的响应特性等,设计核电子学测量系统,实现探测信号的有效检出。

2.1 元器件选择

选择探测元器件时,为达到低成本,首先需考虑的是该器件必须是商业上广泛应用且易获得的;然后考虑器件的物理特性,包括波长响应范围、响应度、量子效率、响应速度、线性饱和、反向击穿电压和暗电流等。除考虑上述物理特性外,还需考虑器件的稳定性、结电容、偏置电压和功耗等^[4]。PIN型光电二极管作为光电转换器件,已有配合闪烁体做成辐射探测设备的先例^[5-7]。近年来,国内外也开展了一些直接利用PIN光电二极管进行辐射探测的研究。Oliveira等^[8]开展的光电二极管作为直接辐射探测器件的性能对比研究表明,BPW34的重复性和再现性最好(相对偏差 $<1.6\%$),对辐射的灵敏度最高,最适合做辐射监测器件。因此,本文采用BPW34作为探测元器件。

2.2 总体架构

硬件电路设计主要包括探测和控制两部分,实现的主要功能分别是对 γ 辐射的可靠测量和与智能手机的交互。功能电路的总体架构如图3所示。电路主要包括探测模块、人机交互模块、电源模块及控制器模块。控制器SoC采用Texas Instrument生产的CC2640处理器,探测模块为自主封装的独立模块Raycore。电源模块包括锂电池和电源调理电路,为各模块工作提供需要的电源。人机交互模块包括LED指示灯、开关、USB接口和蓝牙天线。

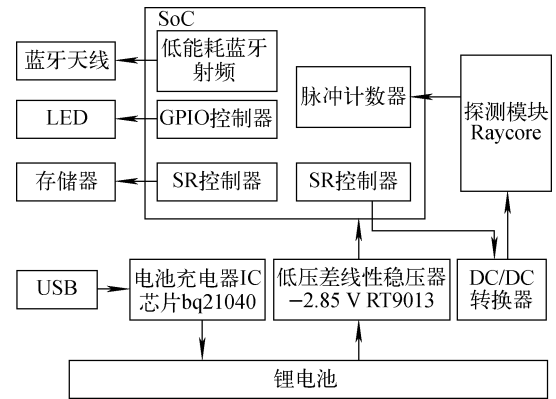


图3 功能电路的总体架构

Fig. 3 Overall architecture of functional circuit

2.3 探测模块设计

探测模块的硬件设计目标是放大PIN光电二极管探测 γ 射线后输出的微弱探测信号。 γ 射线在PIN探测器中会产生电荷脉冲。为获得线性放大的输出信号,该电荷脉冲经电荷灵敏放大电路后转换为正比于入射 γ 射线强度的一级放大电压脉冲^[9]。电压脉冲经次级电压放

大电路进一步放大后,通过幅度甄别转换为数字逻辑脉冲并经单稳态触发送入控制器模块,从而实现脉冲信号的采集。为提高测量精确度,达到更高的信噪比,本文的探测模块电路设

计经多次试验改进增强了对信号和噪声的甄别,分别对次级放大器输出的上阈和下阈进行比较,滤除振动等引入的噪声,防止误计数。探测信号输出电路如图 4 所示。

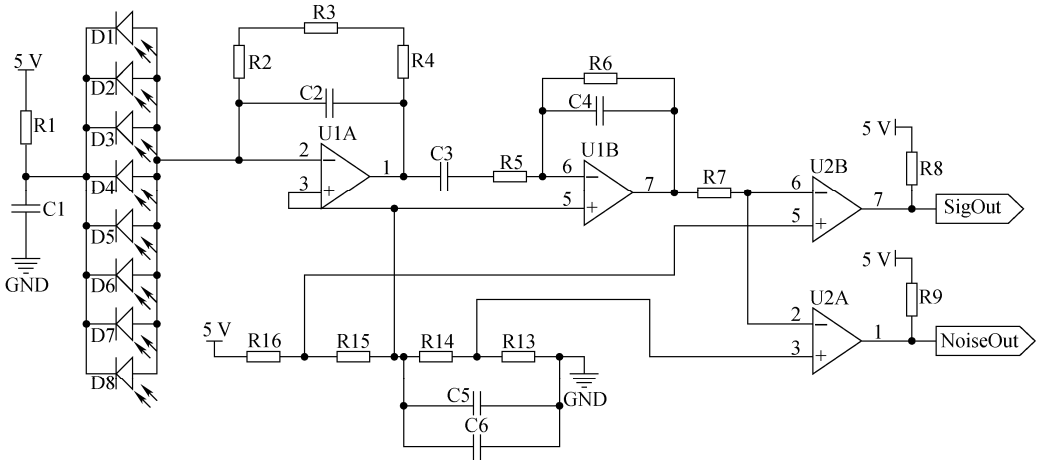


图 4 信号输出电路

Fig. 4 Detection signal output circuit

PIN 光电二极管是光敏器件,为降低相互串扰,本文对探测元器件及放大电路进行了独立模块设计,并将其封装。为保证探测模块的可靠性,设计时还考虑了电路板印刷制版的设计、电磁屏蔽、避光、防震、防潮。另外,为满足便携的需求,本文对电路采取了集成化设计。最终的设计方案是电磁屏蔽采用铜箔包封和外加金属壳封装;避光工艺采用环氧树脂密封,在避光的同时避免发生磨损和劣化;防潮采用电路清洁烘干后浸蜡。

封装后的探测模块从放大器输出端、单稳态输出端分别引出测试点,引出地线用于屏蔽接地,留 +5 V 电源接口。整个设计结构紧凑,地线设计布置相对合理,适当屏蔽后得到更低的噪声。探测模块的几何结构如图 5 所示。邮票孔开孔直径 1 mm,焊盘直径 2 mm,在邮票孔相对位置开窗以供焊接固定。各引脚及测试点的定义列于表 1。

2.4 控制器设计

控制器采用 TI 生产的 CC2640F128 芯片。该芯片是专门针对蓝牙智能应用的超低功耗无线 MCU,内含 1 个 32 位 ARM Cortex-M3 内核和 1 个超低功耗传感器控制器。该芯片具有极低的有源 RF、MCU 电流及低功耗模式流

耗,可确保电池使用寿命长,满足本文研制的探测设备所需的低功耗、小尺寸要求^[10]。控制器

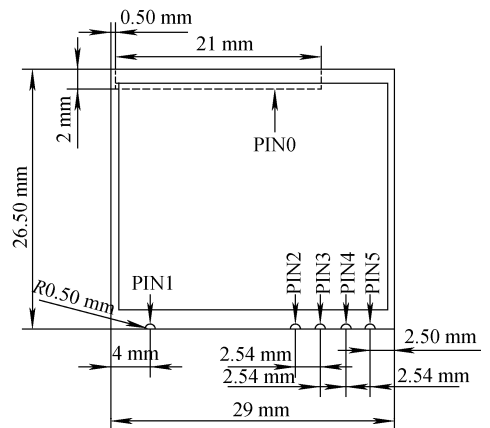


图 5 探测模块的几何结构

Fig. 5 Geometric structure of detector module

表 1 探测模块引脚定义

Table 1 Pin definition of detector module

管脚	功能描述	电平范围
PIN0	底层铺地开窗,用于固定探测器	GND
PIN1	地	GND
PIN2	地	GND
PIN3	电源输入	5.5~12 V
PIN4	射线信号,5 V 偏置上的负脉冲	-5~0 V
PIN5	干扰信号,0 V 偏置上的正脉冲	0~5 V

的设计实现了设备与智能手机间的交互和控制功能。嵌入式程序实现的功能包括:1) 探测信号的检测及剂量率计算;2) 数据存储功能;3) 电量检测、温度读取功能;4) 空中升级功能。通过空中升级可便捷地对探测设备进行 bug 修复和功能升级。

3 智能终端 APP 的开发

智能手机端的 APP 是用户与设备的关键交互平台。APP 需能与探测设备建立蓝牙连接、控制探测设备、对探测结果进行预处理、对探测数据可视化、与云端服务器进行通信等。本文开发的 APP 具有友好的人机交互系统,可实时显示空气吸收剂量率,并能融合地图信息显示辐射探测值,还可以个人用户登录实现数据共享、累积剂量统计等。IOS 版本 APP 在 Xcode 环境下采用 Objective-C 语言开发。

4 性能测试

4.1 剂量率响应

PIN 光电二极管探测器输出的是脉冲计数,该脉冲计数与辐射剂量率呈正比。本文通过已知辐射场刻度,拟合得到脉冲计数与剂量率的转换关系。参考辐射场是采用标准的¹³⁷Cs放射源,根据距离修正得到不同剂量率的标准辐射场。设备的探测数值取多次测量的平均值。对测量数据进行二项式拟合(未计入最后 1 个数据点)的结果如图 6 所示。由图 6 可知,当剂量率小于 6 mGy/h 时,剂量率响应线性较好。当剂量率达到 9.9 mGy/h 时,设备的剂量率响应相比 384 μGy/h 条件下,降低 50% 左右。因此,推算探测设备的探测上限约为 6 mGy/h。

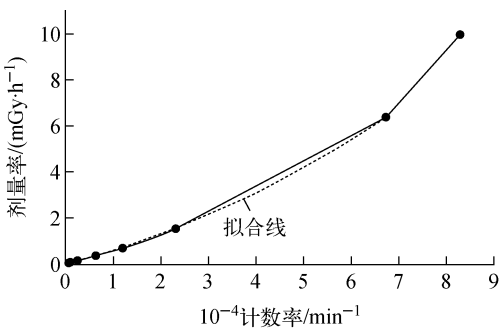


图 6 计数率与剂量率的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of counting rate and dose rate

4.2 能量响应

能量响应是辐射探测设备的重要性能参数。能量响应特性主要取决于 PIN 光电二极管的原始响应特性,同时又与探测电路的响应、信噪比、阈值等特性有关。本文能量响应的测试实验使用 X 光机和¹³⁷Cs、⁶⁰Co 产生的标准辐射场,校准后的剂量率和能量响应测试结果列于表 2。

表 2 校准后的剂量率和能量响应测试结果

Table 2 Dose rate and energy response test result after calibration		
中心能量/ keV	参考 剂量率	能量响应/ ($\text{min}^{-1} \cdot \mu\text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
30	61.20	0.03
48	42.57	3.82
60	36.39	19.99
109	34.97	36.25
149	24.34	22.51
185	25.83	19.39
662	229.51	16.65
1 331	58.88	13.95

探测设备的能量响应变化如图 7 所示。对比常用的高气压电离室 GE-Reuter Stokes RSS131 辐射监测仪的能量响应,本探测设备的能量响应变化趋势与其相似。图 7 中,100 keV 左右响应值最高,50 keV 左右射线响应明显不足。理想情况下,探测器的单个脉冲计数应对应于 1 个单位的照射量,而与入射光子的能量无关。但实际情况下探测器响应会随能量变化,本文的数值计算结果也验证了这一点。为消除或抑制这种变化,可通过增加金属滤片的方式实现能量补偿^[11]。

4.3 温度特性

PIN 光电二极管探测器的性能通常会受到温

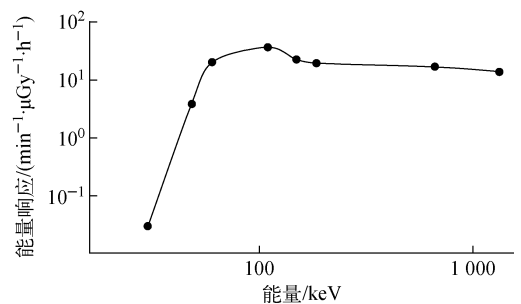


图 7 探测器能量响应曲线

Fig. 7 Detector energy response curve

度的影响,暗电流也会随温度变化而变化。因此,本文对探测器的温度响应也进行了测试。探测器的漏电流和噪声均会随温度的增大而增大。探测设备的工作温度上限取决于最大噪声或探测器的反向击穿电压与温度的关系。对温度特性的测试实验是通过调节恒温箱的温度,测试不同温度下探测设备探测本底计数和 ^{241}Am 的结果,由此得到探测设备的失效温度。探测设备计数率随温度的变化如图8所示。由图8可知,设备在 $-30\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内工作良好。但随温度升高,本底计数率和 ^{241}Am 的计数率均呈增大趋势。温度超过 $53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,探测数值陡然增加,探测器可能失效。温度较低时,探测数值稳定,同时高频白噪声减小。该结果与PIN光电二极管的物理特性吻合。若想在更高温度下实现有效探测,则需进一步考虑局部降温措施或温度补偿方法。

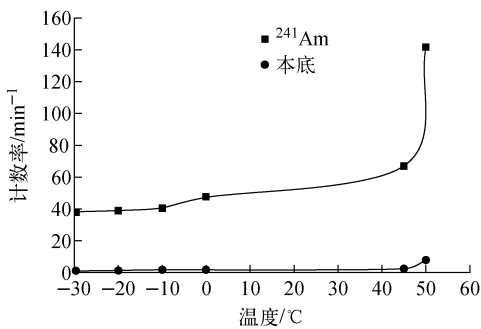


图8 探测器温度响应特性

Fig. 8 Detector temperature response characteristic

4.4 检定结果

为了解设备的主要性能指标,在国防科技工业电离辐射一级计量站对本文研制的探测设备进行了校准和检定。校准和检定的依据规程为JJG 521—2006。主要检定结果为:设备重复性 8% (规程要求指标 15%);相对固有误差最大值 16% (测量了4个剂量水平,规程要求指标 $\pm 25\%$);能量响应归一化后的范围为 $0.81\sim 0.93$ (规程要求 $0.70\sim 1.30$)。各项指标均符合国家规程的要求。

5 结论

本文研制了一款新型的智能辐射探测系统,该系统的前端探测器使用廉价的商用PIN光电二极管作探测元器件,采用手机等智能终

端设备控制探测器,满足了公众可自行对环境辐射进行监测的需求。该系统具有成本低廉、轻便易操作、低功耗、稳定可靠等性能。探测设备的待机功耗仅约为 $100\ \mu\text{W}$,探测时功率约为 $10\ \text{mW}$,选用合适容量的电池作为电源时,设备可长时间工作,技术指标满足国家规程要求。

参考文献:

- [1] 金慧英,杨龙,荣曙,等. 从谣“盐”看福岛核泄漏事故对公众心理的影响及对策[J]. 职业卫生与应急救援,2011,29(3):127-129.
- [2] 陈伯显,张智. 核辐射物理及探测学[M]. 北京:哈尔滨工程大学出版社,2011.
- [3] KNOLL G F. Radiation detection and measurement[M]. Fourth Edition. USA: Wiley, 2010.
- [4] 邓长明,刘正山,张志勇,等. SDM2000 半导体个人剂量仪探测器实验及测量电路研制[M]//中国核科技报告. 北京:中国原子能出版社,2004.
- [5] 陈祥鹏. 基于光电二极管的核辐射探测仪器的研制[D]. 北京:中国地质大学,2016.
- [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.
LIU Zhengshan, DENG Changming, ZHANG Zhiyong, et al. A study on PIN semiconductor of the SDM2000 personal dosimeter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, 25(6): 661-663(in Chinese).
- [7] YANG I, MATSUMOTO Y, ICHIMIYA R, et al. Development of mobile radiation monitoring system utilizing smartphone and its field tests in Fukushima[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3 520-3 526.
- [8] OLIVEIRA C N P, KHOURY H J, SANTOS E J P. PIN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications[J]. Physica Medica, 2016, 32(12): 1 495-1 501.
- [9] GRAEME Jerald. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 赖康生,等译. 北京:科学出版社,2012.
- [10] 朱文斌,张彦,芮亚楠. TI 针对可穿戴的传感器和无线产品[J]. 世界电子元器件,2015,1(6):42-43.
- [11] CHEN C R, JIANG S H, TSENG H H, et al. Energy response and filter compensation of PIN Si photodiode for personal dosimetry application [C]//Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference. [S. l.]: IEEE, 1992.