光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021111901

基于单片机多模式控制的 APD 偏压电路模块设计

张建华*，尹　俊，朱　斌，何　达，柳稼齐

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对雪崩光电二极管(APD)应用多样化的需求，提出多模式控制的 APD 偏压电路模块设计方案。基于 APD 工作原理，分析了 APD 增益系数、反向偏置电压、工作温度三者之间的关系，设计了具有多模式工作的 APD 偏压模块硬件电路，开展了详细的单片机软件功能设计。结合雪崩光电二极管进行了实验验证，结果表明在－40～＋60 ℃温度范围内，该偏压电路模块具有温度补偿及多模式切换功能，输出电压偏差小于 0.5 V，纹波小于 100 mV，可实现 APD 多模式工作，满足工程化应用需要。

关键词： 雪崩光电二极管；反向偏置电压；温度补偿；多模式控制；偏压电路

中图分类号： TN312　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0400－05

Design of APD Bias Circuit Module Based on Multi-mode Control of Single Chip Microcomputer

ZHANG Jianhua, YIN Jun, ZHU Bin, HE Da, LIU Jiaqi

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In response to the diverse applications of avalanche photo-diode (APD), a design solution of bias circuit module with multi-mode control was proposed. Based on the working principles of APD, the correlation among gain coefficient, reverse bias voltage and operating temperature was analyzed. The bias circuit modules with multi-mode control were designed, the software design was realized on the single chip microcomputer, and the module was analyzed and verified by experiments. Experimental results show that the bias circuit module with multi-mode control and temperature compensation is available in the temperature range of －40～＋60 ℃, the deviation of the output voltage is less than 0.5 V, and the ripple is less than 100 mV. The module can realize APD multi-mode operation and meet engineering applications.

Key words: APD; reverse bias voltage; temperature compensation; multi-mode control; bias circuit

0　引言

雪崩光电二极管(APD)具有灵敏度高、响应速度快、能耗低、体积小等优点[1]，在激光测距、激光雷达、光通信探测和军事测量等领域得到广泛应用[2-4]。通过对 APD 施加反向偏置电压，利用其内部雪崩倍增效应，可将输出信号倍增上百倍，实现极高的探测灵敏度。但不同的应用背景对 APD 信号的增益倍数需求有所区别。近距离探测系统需要 APD 工作在较低的增益模式下，过高的增益容易造成探测信号饱和，影响信息提取；对远距离探测系统，则要求 APD 工作在较高的增益模式下，实现对微弱信号的探测。偏压电路作为 APD 反向偏置电压的提供模块，与 APD 信号增益密切相关，是保证 APD 工作在最佳状态的关键。目前的偏压电路主要基于特定需求进行设计，解决 APD 在远距离或近距离等单一背景下的应用需求。当 APD 应用背景发生改变时，偏压电路模块仍保持原来的工作模式，APD 输出的探测信号将受到较大影响，因此有必要设计一种高适用性、多模式工作且可控的反向

收稿日期：2021－11－19.

*通信作者：张建华　E-mail：hitzhjh@163.com

偏压模块电路。

针对 APD 应用背景多样化的需求，本文提出一种多模式控制的偏压电路模块设计方案，基于 APD 工作机理，分析了信号增益系数、反向偏置电压以及芯片工作温度三者之间的关系，开展了具有多模式工作的偏压模块电路设计，对偏压电路进行了详细的软件设计。结合 APD 器件搭建实验系统，进行了验证和分析，为实现 APD 多模式工作提供了技术途径。

1　偏压电路模块设计

1.1　APD 特性

APD 是具有雪崩倍增效应的 pn 结光电二极管，在 pn 结上加高反向偏置电压，入射光被吸收产生电子-空穴对，继而被 pn 结的高电场加速，碰撞晶格产生二次电子-空穴对，发生碰撞电离效应。在高电场作用下，电子-空穴对再次被加速，碰撞产生更多的电子-空穴对，发生雪崩倍增效应。APD 的雪崩增益，又称倍增系数，定义为[5]

$$M = I_M / I_R \tag{1}$$

式中，M 为倍增系数，I_M 为有雪崩增益时 APD 芯片输出的光电流，I_R 为无雪崩增益时光生电流的平均值。

APD 倍增系数与施加的反向偏置电压密切相关。通过经验公式，倍增系数与反向偏置电压的关系式可近似表示为

$$M = 1/(1-(V/V_{BR})^n) \tag{2}$$

式中，V 为施加的反向偏置电压，V_{BR} 为 APD 器件的击穿电压，n 为常数，与 pn 结的结构及材料有关。由式(2)可知，当反向偏置电压接近器件的击穿电压时，倍增系数迅速增大；而当反向偏置电压等于器件的击穿电压时，倍增系数趋于无穷大，此时 APD 工作在盖革模式，具有单光子探测能力，但 pn 结容易被击穿烧毁。

在 APD 器件的应用过程中，器件的信噪比决定系统的探测精度，是系统的关键性能指标之一。而 APD 的倍增系数是影响系统信噪比的关键因素，二者关系可以表示为[6]

$$SNR = I_L^2 M^2 / (2q(I_L + I_{DG})BM^2F + 2qI_{DS} + (4kTB/R_L)) \tag{3}$$

式中，SNR 为 APD 输出信号的信噪比，I_L 为无倍增增益时的光电流，与输入光信号功率成正比，q 为输入光信号功率，I_{DG} 为参与倍增的暗电流，I_{DS} 为不参与倍增的暗电流，B 为系统信号带宽，F 为过剩噪声系数，k 为波尔兹曼常数，T 为绝对温度，R_L 为信号负载。由式(3)可知，选择适当的倍增系数可以使器件的信噪比获得最大，此时 APD 对应的增益称为最佳雪崩增益，施加在 APD 的反向偏置电压称为最佳偏压。系统中 APD 的倍增系数很高，最优雪崩倍增系数可以表示为[7]

$$M_{opt} = (4kT/q(I_L + I_{DG})nR_L)^{1/(2+n)} \tag{4}$$

式中，n 为 APD 的过剩噪音指数，与 APD 的结构和制作材料有关。由式(4)可知，最佳雪崩增益与器件工作温度、输入光信号功率、器件自身的暗电流及负载等有关，其中温度的影响最为突出。温度的变化是影响最佳雪崩增益的关键因素[8]。因此当温度变化时，欲使 APD 保持在某一恒定增益下，必须对 APD 的偏压进行调整以补偿温度所造成的影响[9]。

由上述分析可知，APD 增益系数与反向偏置电压有关，温度的变化又是最佳雪崩增益的关键因素。因此，偏压模块电路设计不仅要求偏置电压变化可调、电压波纹小，同时需要监测 APD 的工作温度，实时对偏置电压进行调整以补偿工作温度变化造成的影响。

1.2　偏压模块设计方案

结合 APD 应用背景多样化的需求以及偏置电压具备变化可调、波纹小和温度补偿功能的设计要求，多模式控制的偏压模块方案设计如图 1 所示。

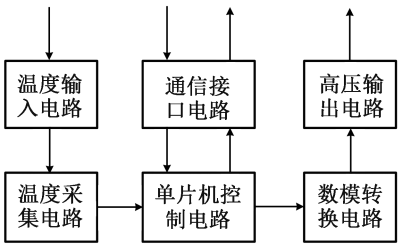


图 1　多模式控制的高压模块方案

偏置电压模块由温度输入电路、温度采集电路、单片机控制电路、数模转换电路、高压输出电路、通信接口电路和电源转换电路组成。APD 器件的工作温度信息通过温度输入电路获取，然后通过温度采集电路转换为数字信号，并由单片机控制电路进行处理后转换为高压控制的数字信号，数字信号再通过数模转换电路变成模拟信号，最后由高压输出电路输出偏置电压，用于控制 APD 的增益系数。通信接口电路用于 APD 工作模式参数的配置和工

作模式的控制，电源转换电路则将输入电源转换成各模块电路所需的二次电源。

1.3 偏压模块电路设计

(1)温度输入及采样电路

温度的变化是影响 APD 器件最佳雪崩增益的关键因素，直接影响输出信号的信噪比，决定系统的探测精度。为保证偏压模块电路温度信息的准确性，由温度输入电路提供一路基准电压输出信号，用于将 APD 器件的温度信号转换成电压输入信号，然后采用具有低温漂、低噪声、轨到轨的运算放大电路对温度电压信号进行处理；最后采用基于高精度的模数转换芯片的温度采样电路将温度电压信号转换成数字信号。

温度输入及采样电路的详细设计如图 2 所示。提供一路基准电压 V_{REF} 输出用于外围电路将 APD 器件的温度信号转换成电压输入信号；运算放大电路采样 ADI 公司型号为 LTC2063 的芯片进行设计，温度漂移仅为 0.02 μV/℃，输入失调电压为 5 μV；模数转换电路采用 ADI 公司型号为 AD7680 的芯片进行设计，数据深度为 16 位。

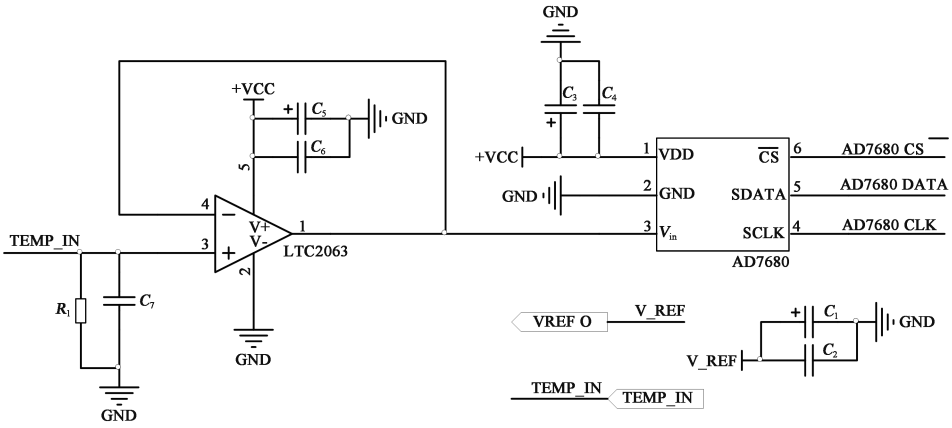


图 2 温度输入及采样电路

(2)数模转换及高压输出电路

要实现对 APD 器件倍增系数的精准控制，输出的偏置电压要求具有输出偏置电压变化可调、波纹小、调节精度高，同时为满足器件多模式工作需求，还必须具有输出量程范围大的特点。为实现偏置电压的精准可控，数模转换电路设计采用 ADI 公司的 LTC1658 芯片，该芯片数据深度为 14 位；高压输出电路则选用输出电压范围为 0～600 V，纹波小于 100 mV，输入控制电压为 0～+5 V，且输入和输出成线性关系的高压器件。

(3)单片机控制及通信接口电路

单片机控制电路是偏压电路模块的核心电路，主要用于控制模数转换器完成温度电压信号采样，利用温度信息和 APD 工作的模式选择进行计算处理，得到 APD 当前所需偏置电压的数字信号，控制数模转换器，完成偏压数字控制信号转换成高压器件的模拟电压控制信号。基于 Microchip 公司的 PIC16F1825 型单片机设计，芯片内置精确的 32 MHz 振荡器，包含 256 字节的 EEPROM 可存储用户参数，支持串行外设接口以及通用异步收发传输接口等通信方式。单片机控制电路通信接口电路采用 ADI 公司的 ADM101EARM 接口芯片设计，主要用于实现模块初始值设置、工作模式选择、温度及偏压信息读取等指令的收发功能。

1.4 软件设计

本文偏压模块电路软件设计基于 Microchip 公司的 PIC16F1825 型单片机开发，采用 Microchip 公司 MPLAB IDE 设计平台编写软件代码，软件具体流程如图 3 所示。偏压电路模块上电后，按照参数装订的初始值和默认工作模式进行工作，读取温度信息，并依据当前工作模式参数设置计算输出偏置电压。偏置电压模块工作过程中，通过发送相关指令，可以实现对偏压模块电路的控制。

针对不同 APD 型号的应用以及多模式工作的需求，软件设计提供三类指令对偏压模块电路进行控制。三种指令类型分别是 APD 工作模式的切换，温度、偏压以及配置参数等信息读取，以及不同模式下自适应偏压的参数设置。设置有常规增益模式、高增益模式、低增益模式、固定偏压输出模式和自定义模式等多种工作模式；每种工作模式各设置 4 个寄存器参数，用于该模式依据温度信息自适应输出偏置电压，从而实现对 APD 工作过程中的温

度补偿；信息读取指令可以获取 APD 工作过程中的温度以及偏置电压等信息，通过监测温度偏压等信息的变化，实时切换 APD 的工作模式。

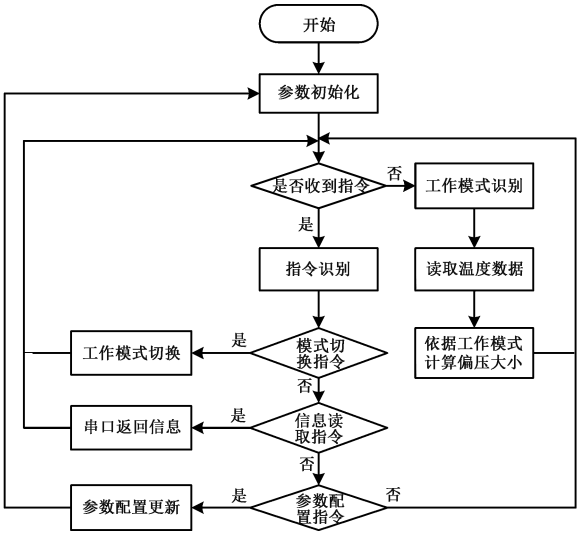


图 3　偏压模块电路软件设计流程图

2　实验验证

为了验证偏压电路模块输出偏置电压具备变化可调、波纹小和温度补偿的功能以及对 APD 器件多模式控制的效果，基于重庆光电技术研究所生产型号为 GD6217Y 的 APD 开展实验验证。GD6217Y 在常温 25 ℃下的击穿电压为 184.5 V，击穿电压的温度变化系数为 1.137 7 V/℃，APD 内部采用的温度传感器为 AD590，该芯片为电流型温度传感器，具有温度范围宽且线性度好的特点，常温 25 ℃下的输出电流为 298.2 μA，温度变化系数为 1 μA/K，使用过程中需要通过下拉电阻将电流信号转换成电压信号。

本实验系统中，AD590 下拉电阻采用 10 kΩ 设计，常温 25 ℃输出电压值为 2.982 V，偏压电路模块温度采样范围为 0～5 V，可以覆盖 GD6217Y 型 APD 产品的工作温度范围。依据 GD6217Y 器件特性，偏压电路模块设置常规增益、高增益、低增益三种 APD 工作模式，输出的偏置电压与击穿电压的比值分别为 0.92，0.88 和 0.7。实验系统由实验测试电路板、偏压电路模块、GD6217Y 型 APD 产品、上位机测试软件、稳压电源及信号检测等设备组成，如图 4 所示。

GD6217Y 型 APD 器件的温度信号通过测试电路板输送给偏压电路模块；偏压电路模块依据 APD 的温度信息和工作模式计算处理输出偏置电压至 GD6217Y 型 APD 器件；上位机测试软件可以读取温度、偏置电压、配置等参数，同时可以对 APD 工作模式进行切换，对模式配置参数进行更新。试验过程中通过万用表、示波器等设备监测偏置电压、温度信号的输出以及 APD 器件的模拟信号。

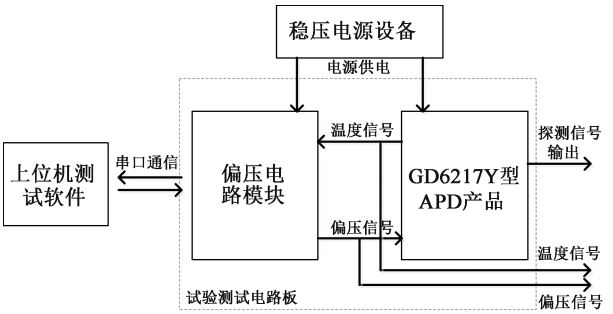


图 4　实验系统组成

整个实验通过高低温箱进行，设置 6 个测试监测点：－40，－20，0，＋20，＋40 和＋60 ℃。实验过程中通过上位机对偏压电路模块发送指令，实现 APD 工作模式的切换，分别记录三种工作模式在不同温度测试点下偏置电压的输出值，并与 GD6217Y 理论击穿电压值进行对比分析，试验数据记录如表 1 所示。

表 1　实验过程不同模式偏压输出值测试记录

温度设置/℃	温度电压信号/V	常规增益模式偏压输出值/V	高增益模式偏压输出值/V	低增益模式偏压输出值/V	GD6217Y 击穿电压理论值/V
－40	2.359	100.2	105.0	79.2	113.6
－20	2.558	119.7	125.5	95.6	136.3
0	2.760	140.1	146.8	111.3	159.2
＋20	2.962	160.1	167.3	127.6	182.2
＋40	3.163	180.6	188.9	143.8	205.1
＋60	3.365	201.1	209.6	160.1	228.1

通过温度电压信号可以得到 APD 器件内部的真实温度，与温箱设置温度对比存在误差，主要是加电工作中会产生热量，导致 APD 器件的内部温度比环境温度高。通过 APD 器件的击穿电压，可以计算出不同模式下的偏置电压理论值。将理论值与偏压电路模块在不同模式下输出的偏置电压测试值进行比较，结果分别如图 5 和 6 所示。

由图 5～6 可知，在－40～＋60 ℃温度范围内，偏压电路模块具备温度补偿和多模式切换功能，在常规增益、高增益和低增益三种模式下，偏置电压输出值与理论计算值保持一致，偏压输出误差小于 0.5 V。在实验过程中，偏压电路模块的偏压输出性能稳定、体积小，可满足工程化应用。

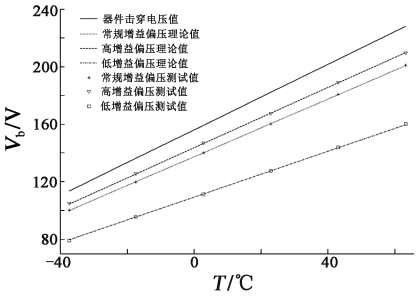


图 5 不同模式下偏压测试值与理论值分析

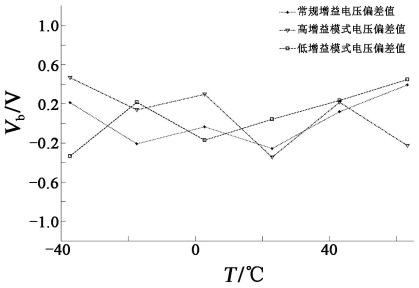


图 6 不同模式下偏压测试值偏差值分析

3 结论

本文提出了一种多模式控制的偏压电路模块设计方案。结合 APD 应用背景多样化的需求以及偏置电压具备变化可调、波纹小和温度补偿功能的设计要求，基于单片机平台，开展了低温漂的运算放大电路、高精度的数模转换电路和输出范围广精度高的高压输出电路等电路设计，完成了具备多模式工作的偏压电路模块设计。通过开展实验，验证了在 −40～+60 ℃温度范围内，偏压电路模块性能稳定可靠，具备温度补偿和多种工作模式切换的功能，在不同模式下偏置电压输出准确，偏差小于 0.5 V，纹波小于 100 mV，满足工程化应用需求。

参考文献：

[1] 李 千，吴志勇，高世杰，等. APD 阵列探测器在自由空间光通信上的应用研究[J]. 激光与红外，2018，48(1)：10-17.
Li Qian，Wu Zhiyong，Gao Shijie，et al. Application of APD array detector in free space optical communication[J]. Laser & Infrared，2018，48(1)：10-17.

[2] 郝世聪，张 磊，常 帅，等. 基于 APD 的光通信探测系统设计与性能测试[J]. 长春理工大学学报(自然科学版)，2018，41(1)：8-12.
Hao Shicong，Zhang Lei，Chang Shuai，et al. Design and performance test of an optical communication detection system based on avalanche photodiode[J]. J. of Changchun University of Science and Technol.（Natural Science Edition），2018，41(1)：8-12.

[3] 胡鹏程，杨宏兴，梅健挺. 远程高速激光外差信号的高灵敏度探测器研究[J]. 光电子·激光，2014，25(5)：925-931.
Hu Pengcheng，Yang Hongxing，Mei Jianting. Research on high sensitivity remote high-speed detectors for laser heterodyne signals[J]. J. of Optoelectronics·Laser，2014，25(5)：925-931.

[4] 王 帅，孙华燕，郭惠超，等. APD 阵列单脉冲三维成像激光雷达的发展与现状[J]. 激光与红外，2017，47(4)：389-398.
Wang Shuai，Sun Huayan，Guo Huichao，et al. Development and status of single pulse 3D imaging lidar based on APD array [J]. Laser & Infrared，2017，47 (4)：389-398.

[5] 李天浩，包 维. 微弱光信号探测 APD 处理电路设计[J]. 光电技术应用，2014，29(1)：55-60.
Li Tianhao，Bao Wei. Research on avalanche photodiode processing circuit design for weak light signal detection[J]. Electro-optic Technology Application，2014，29(1)：55-60.

[6] 刘贺雄，周 冰，高宇辰. APD 探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J]. 激光技术，2018，42(6)：862-867.
Liu Hexiong，Zhou Bing，Gao Yuchen. Research of noise characteristics and influence factors of APD detection systems [J]. Laser Technology，2018，42(6)：862-867.

[7] 朱 斌. APD 偏压的自适应电路设计[J]. 电子技术与软件工程，2019(14)：96-97.
Zhu Bin. Adaptive circuit design of APD bias voltage[J]. Electronic Technology & Software Engineering，2019(14)：96-97.

[8] 邹 建，扶 新. 雪崩光电二极管温漂特性的实验研究[J]. 压电与声光，1999，21(2)：79-81.
Zou Jian，Fu Xin. Experimental study on temperature drift characteristics of avalanche photodiode[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，1999，21(2)：79-81.

[9] 曾毓敏. 低耗低纹波可控式 APD 偏置电路[J]. 半导体光电，2002，23(1)：69-71.
Zeng Yumin. Low power，low ripple and controllable biased circuits for APD[J]. Semiconductor Optoelectronics，2002，23 (1)：69-71.

作者简介：

张建华(1989—)，男，硕士，工程师，主要从事光电器件电路设计及参数测试工作。