

基于硅雪崩光电二极管的紫外盖革模式电路的研制

邢怀昌^{1,3}, 许金通^{1,2}, 李向阳^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083; 3. 上海科技大学 信息学院, 上海 201210)

摘要: 本文旨在研制盖革模式电路并在两种紫外光照射下测试电路性能, 为紫外通信提供数据参考。研制了适用于硅雪崩光电二极管(APD)的主动、被动两种盖革模式电路, 设计并实现了输出可调至300.0 V的高稳定直流高压偏置电源, 实测纹波电压小于20.4 mV, 纹波系数小于 6.8×10^{-5} 。分别在可见盲和日盲两种紫外光照下, 测试了被动盖革模式APD的死时间、暗计数和光子计数, 给出了被动盖革模式工作的较佳高压偏置范围; 紫外光照下, 被动盖革模式APD的电路输出脉冲的死时间为1.0 μ s。基于被动盖革模式电路测试的参数, 研制了主动盖革模式电路, 实验结果表明: 主动盖革模式电路输出脉冲的死时间为102.0 ns, 光子计数的上限由被动盖革模式的1.0 MHz提高到主动盖革模式的9.8 MHz。因此主动盖革模式电路在数据传输时有更高的传输带宽, 预计可满足一些图像传输或者视频通信的基本要求。

关键词: 雪崩光电二极管; 盖革模式; 紫外; 死时间; 暗计数

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)10-0966-06

Development of Geiger Mode Circuit with Silicon Avalanche Photodiode for Ultraviolet Optical Communication

XING Huaichang^{1,3}, XU Jintong^{1,2}, LI Xiangyang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 3. Information Institute, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: This paper aims to develop a Geiger mode circuit that is tested under two kinds of ultraviolet light, providing a data reference for ultraviolet communication. Active and passive Geiger mode circuit systems are designed based on silicon APD and given the solution of high-voltage APD bias. High-stability, high-voltage DC bias power was designed that can supply output to 300 V. The measured ripple of the high-voltage DC solution is less than 20.4 mV, and the ripple coefficient is less than 6.8×10^{-5} . The passive Geiger mode circuit system with visible-blind UV and solar-blind UV(two ultraviolet LED light sources) is tested, and the counts and dead time are obtained. The operating range of the optimal bias voltage VG in the passive Geiger mode circuit under two kinds of UV light sources is given. The output pulse dead time of the passive Geiger mode circuit that used a UV light source is 1 μ s. The output pulse dead time of the active Geiger mode circuit with a solar-blind UV light source is 102 ns. Theoretically, the active Geiger mode circuit has a higher transmission bandwidth with respect to the passive Geiger mode circuit, and the upper limit of the count rate is increased from 1.0 MHz to 9.8 MHz. This meets the requirements for UV image transmission and video communication.

Key words: APD, Geiger mode, ultraviolet, dead time, dark counts

0 引言

紫外通信有防干扰、防窃听、非视距通信、电磁

静默等优点, 具有很大的应用潜力。上海技术物理研究所的王荣阳等人对紫外光通信有过较为系统的介绍^[1]。传统紫外光通信多使用线性模式的雪崩光电二

收稿日期: 2017-01-09; 修订日期: 2017-02-27。

作者简介: 邢怀昌(1987-), 男, 河南濮阳人, 硕士, 主要从事紫外APD的盖革模式电路的研制。E-mail: 1047050017@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金(61106097, 61204134, 11304335)。

极管(APD, Avalanche photon diode)^[2], 这限制了对紫外光的探测能力, 所以有效提升紫外光探测能力显得十分迫切。APD采用盖革模式工作是提升光子探测能力的研究重点之一^[1-9]。APD采用盖革模式工作即APD进行短暂的(ns级别)雪崩击穿, 之后快速的恢复到雪崩击穿之前的状态; 在这个短暂的时间内, 雪崩电流可迅速升高, 甚至达μA级别^[2]。APD工作在盖革模式需要有盖革模式电路来驱动; 盖革模式电路是一种可以控制高压偏置快速升高和降低的电路。盖革模式电路的设计需要两个必要因素: 纹波系数较小的高压偏置和有效的淬灭电路^[2]。首先, 高压偏置波动幅度直接影响暗计数和光子计数的输出, 所以纹波系数十分重要。山东大学的魏先政等曾设计过高压偏置的生成方案^[4], 其设计方案最高可输出71.0V直流高压、纹波系数为0.05%。其次, APD的盖革模式工作之初, 雪崩电流迅速升高, 此时需要有效的淬灭^[2], 以防止器件损坏。盖革模式电路根据淬灭以及恢复方式可分为3类, 即被动、主动和门控^[1-4]。3种盖革模式电路各有优缺点: 被动盖革模式电路简单易用, 但死时间长、计数率低; 主动盖革模式电路死时间短, 但相对复杂、容易引入有源器件噪声; 门控盖革模式电路死时间可控, 但它要求门控电压和光信号同时到达APD^[1]。中国科学院物理研究所的梁创测试了可见光下的被动盖革模式电路的暗计数以及信号幅值, 但没有明确给出适合通信的高压偏置范围^[5]; 华东师范大学的权菊香研制并测试了主动盖革模式电路, 把被动模式电路下的死时间缩短到120.0ns^[6]。基于紫外通信的要求, 实验中选择了主动、被动盖革模式电路进行研制, 旨在确定盖革模式电路下的死时间、暗计数、光子计数以及高压偏置的工作范围, 为实际应用提供参考。

1 被动盖革模式探测系统设计与研制

1.1 被动盖革模式电路原理

被动盖革模式电路如图1(a)所示: R_Q 为淬灭电阻, R_C 为取样电阻, V_G 为高压偏置。图1(a)的等效模型如图1(b)所示: C_A 为APD的结电容, C_G 为寄生电容, R_A 为APD的内电阻, V_B 为理想雪崩击穿电压, SW-A为光控开关。该电路可分为3个阶段工作^[3]: ①准备阶段: V_G 设定在雪崩击穿阈值之上, APD的内部电容以及寄生电容开始充电, 电路处于被探测阶段; ②雪崩及淬灭阶段: 光子到达后, SW-A关闭, APD迅速雪崩, 电流上升, R_C 两端的压降升高, 电容放电, 放电时间 $T_Q=R_A \times (C_A+C_G)^{[1]}$, 当电容 C_G 两端的电压下降到雪崩击穿阈值以下时SW-A断开, 电路完成淬

灭; ③恢复阶段: 雪崩淬灭后光控开关SW-A打开, APD通过 R_Q 向电容充电, 充电时间 $T_C=R_Q \times (C_A+C_G)^{[1]}$, 电路再次处于被探测阶段。

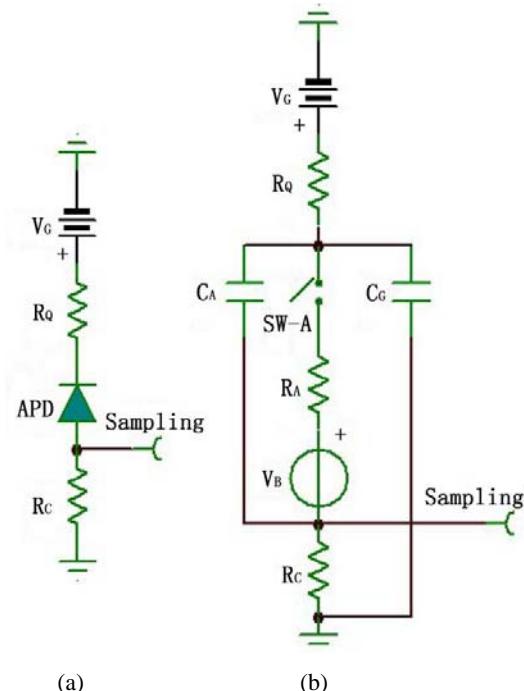


图1 被动盖革模式电路(a)与等效模型(b)

Fig. 1 Passive mode circuit(a) and equivalent model(b)

1.2 被动盖革模式探测系统的设计与研制

被动盖革模式探测系统示意图如图2所示: L_{UV} 为紫外光LED、 R_{LE} 为保护电阻、 V_{LE} 为光源电源。紫外光入射到APD, APD发生雪崩, 产生的脉冲信号经过隔直电容 C_{g1} 进入放大模块, 放大模块选用OPA657作为放大芯片; 放大后的电压信号进入示波器。为避免APD发生自持雪崩^[2]烧坏器件, 淬灭电阻 R_Q 需要根据下式^[2]求解:

$$R_Q \geq (V_G - V_B)/I_Q$$

式中: I_Q 为自持雪崩的临界电流; $V_G - V_B$ 为过偏压值^[2]。

紫外光源分别选取可见盲紫外光(采用紫外LED, 日亚公司生产, 型号为NSHU551B, 中心波长为365.0 m)和日盲紫外光(采用华中科技大学提供的中心波长为278.5 nm的LED)。LED距离APD的距离为102.0 mm。可见盲紫外LED在102.0 mm处的辐照度为23.5 μW/cm², 在APD前放置衰减片($\times 4600$), 衰减后的辐照度为5.2 nW/cm²。日盲紫外光在102.0 mm处的辐照度为60.4 nW/cm²。APD选用PerKin Elmer公司生产的硅基APD(型号为C30902H), 具体性能参数如表1所示, 其有效光敏面积为0.2 mm²。计算得到, 1.0 s内可见盲和日盲紫外光进入APD的光子数分别为19.2 M Photons和172.6 M Photons。

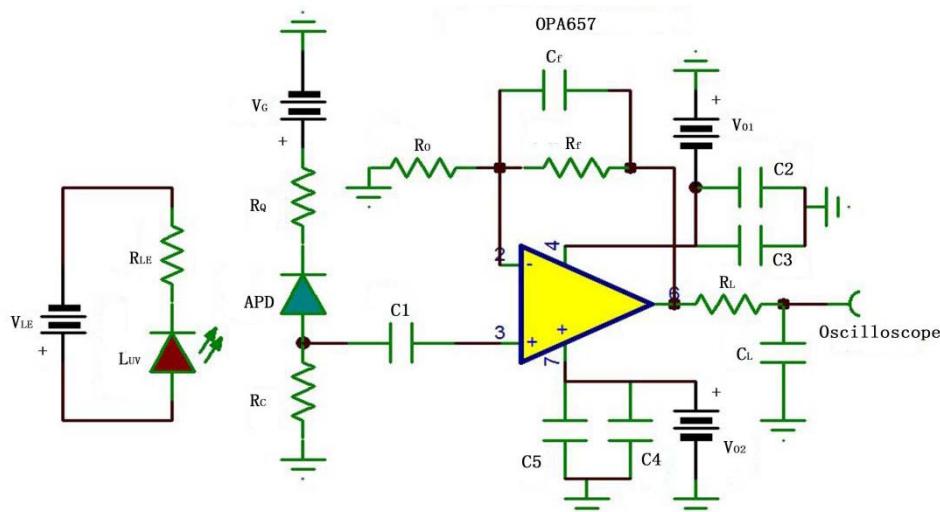


图2 被动盖革模式探测系统示意图 Fig.2 Passive mode system circuit

表1 C30902H 性能参数表 Table 1 C30902H performance parameter

Parameter	Operating voltage/V	Breakdown voltage/V	Dark current/nA	Noise current/(pA·Hz ^{-1/2})	Geiger mode voltage/V	Dark count @VB+1.8 V/(C/s)	Self avalanche current/μA	Junction capacitance/pF	Effective light area/mm ²
Value	204	210.3	6	0.08	212.1	1350	50	1.6	0.2

APD 器件的击穿电压为 210.3 V; 放大芯片需要的电源为 ±5.0 V。电源系统方案示意图如图 3 所示, 实验中使用 DC-DC 开关芯片 LM2587 进行升压, 12.0 V 电压经过 LM2587 后, 把二极管 D₂ 阳极处的电压升压到 36.0 V; 通过变压器 Trans 把 36.0 V 升压到 300.0 V。升压后的 300.0 V 高压通过整流二极管 D₃ 和简单滤波电容 C₁₈ 获得直流高压; 直流高压通过滑动变阻器分压为两路, 其中一路经过 L₁₁ 和电容 C₃₄、C₃₇ 滤波器输出直流高压偏置, 另一路供给 WRA1205S 做 IC 电源解决方案的输入端。IC 电源所需的正负电源, 由 DC-DC 模块 WRA1205S 转换后加 LDO 稳压获得。WRA1205S 是带有控制端口的升压模块, 电压输入是 12.0 V, 电压输出是 ±15.0 V, 输出电流的最大值是 ±300 mA。LDO 选用的是 LM2990 和 UA78M 系列, 两个芯片可以固定输出 ±5.0 V 电压。实验测得直流高压偏置纹波的最大幅值不超过 20.4 mV, 如图 4 所示。

1.3 实验分析与结果论证

假定寄生电容 C_G 为 1.0 pF, APD 内阻 R_A 为 100 kΩ^[2]。选定 R_Q 为 200 kΩ、R_C 为 1 kΩ, 如表 1 所示, 结电容为 1.6 pF。被动模式电路下的淬灭和恢复时间, 可由公式推算得到:

$$T_Q = 100 \text{ k}\Omega \times (1.0 \text{ ps} + 1.6 \text{ ps}) = 260.0 \text{ ns}$$

$$T_C = 200 \text{ k}\Omega \times (1.0 \text{ ps} + 1.6 \text{ ps}) = 520.0 \text{ ns}$$

T_Q、雪崩时间 T_Q* 以及 T_C 之总和为死时间, 约为 1.0 μs。

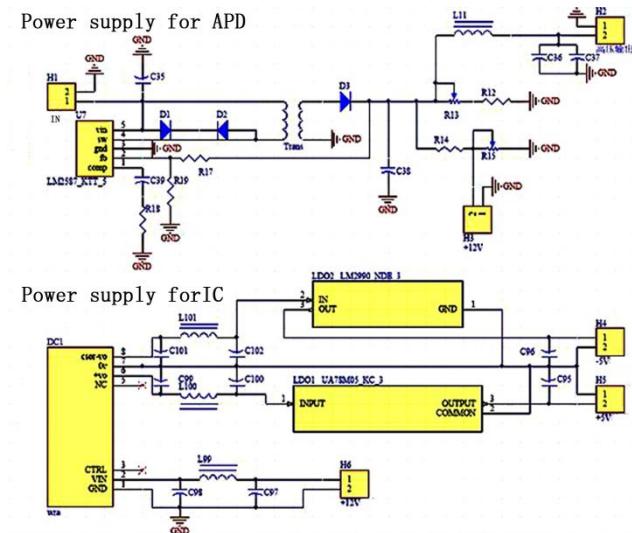


图3 电源系统解决方案示意图

Fig.3 Solutions of power system

紫外光照射下输出的电压脉冲波形如图 5 所示, 可以得到死时间为 1.0 μs, 该实际测试值与理论分析值 (1.0 μs) 一致。放大器输出电压信号幅值的变化如图 6 所示: 随 V_G 的增加, 有光、无光时输出信号幅值都增加。在 V_G 为 209.8 V 时, 无光照下, 输出信号幅值超过日盲紫光照射下的输出信号幅值; 在 V_G 为 210.3 V 时, 无光照下, 输出的信号幅值超过可见盲紫外光照射下的幅值。

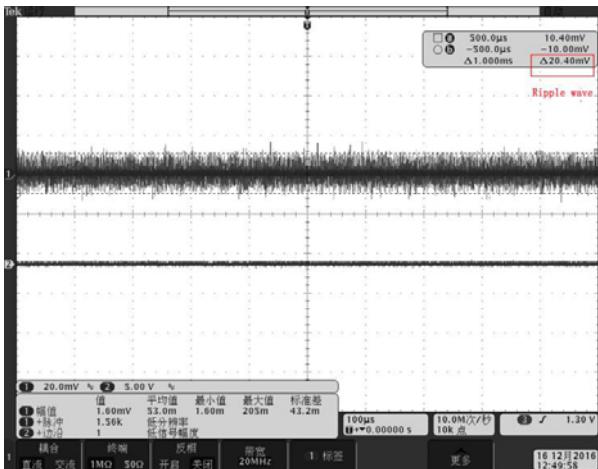


图4 高压偏置 V_G 纹波幅值

Fig. 4 The ripple amplitude of V_G

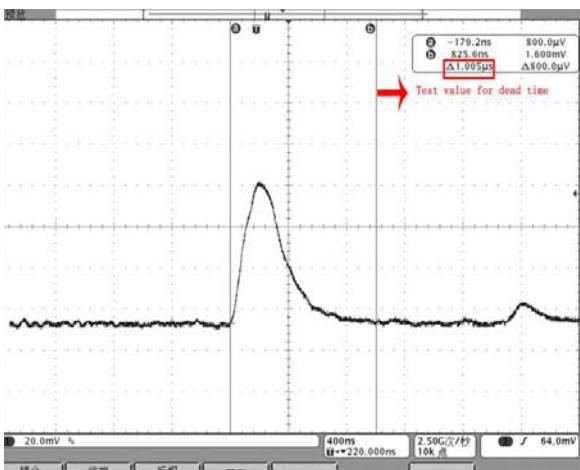


图5 被动盖革模式的输出脉冲

Fig. 5 The dead time of passive mode Geiger is 1.0 μ s

两种紫外光照射下, 光计数、暗计数随高压偏置 V_G 的变化如图 7 所示: 其中图 7(a)为可见盲紫外光照下, 暗计数和光计数都随高压偏置的增加而增大。暗计数影响紫外通信的质量, 选择合适的偏置 V_G 值, 从而把暗计数限制在合理范围十分重要。如图 7(a)所示, V_G 为 210.2 V 时, 光计数与暗计数的比值较大, 此时对应于可见盲紫外通信的较佳的工作点; 同理可知, 在图 7(b)可以选择 210.0~210.5 V 作为日盲紫外通信的工作点。

由图 5 所示的脉冲波形可知, 被动盖革模式电路下的死时间为 1.0 μ s。死时间的大小影响光子计数的上限, 从而影响紫外通信时数据的传输带宽。减小死时间, 从而提升光子计数的上限, 对于增大通信的带宽很有必要; 而主动盖革模式电路可以通过反馈减小死时间, 提升计数率上限。

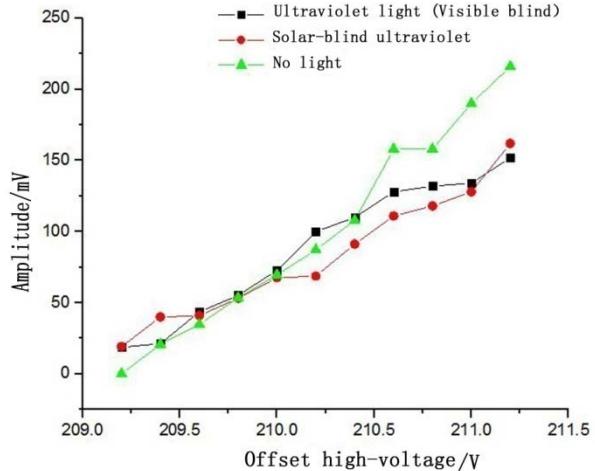


图6 高压偏置 V_G 与放大器输出的信号脉冲电压幅值关系图

Fig. 6 The relationship between V_G and the output pulse voltage amplitude

2 主动盖革模式探测系统的设计与研制

2.1 主动盖革模式探测系统的设计

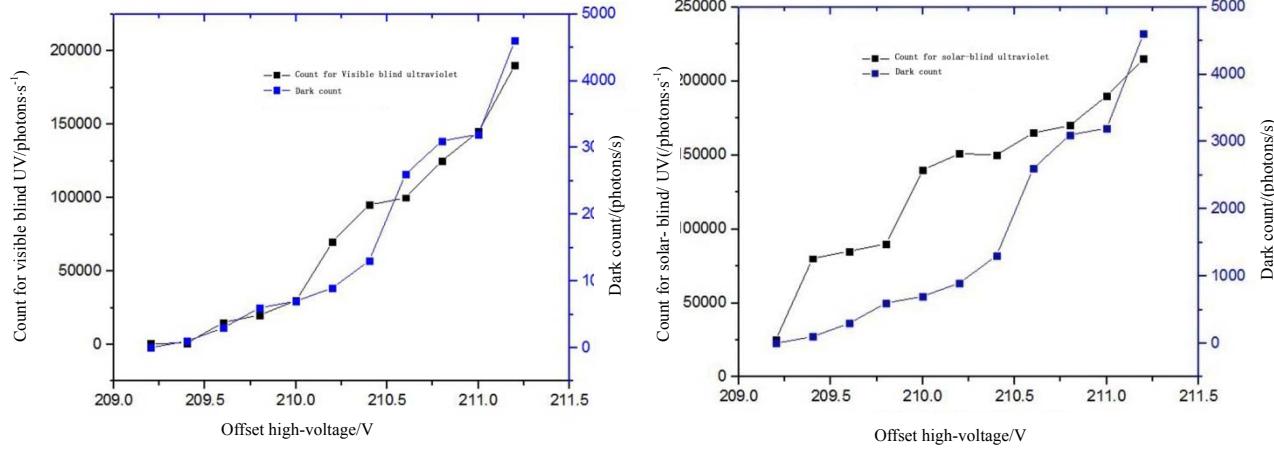
主动盖革模式电路在被动盖革模式电路的基础上引入反馈, 通过反馈控制电路的淬灭与恢复。整个探测系统示意图如图 8 所示, 可分为 3 部分: 电源部分、信号部分和计数模块。电源部分为整个系统提供高压偏置电源和 IC 供电电源, 该部分的设计仍使用图 3 提供的电源解决方案。信号部分在被动盖革模式电路的基础上, 加入了整形、触发、淬灭和恢复 4 部分。计数模块为外围电路, 负责记录节点 D 输出信号的上升沿个数, 由 FPGA 开发板搭建, 采用等精度设计^[9-11], 通过 verilog 程序实现。

整个探测系统的工作原理如下: V_G 工作在击穿阈值之上, 紫外光照后, APD 发生雪崩, RC 端口 B 的信号通过隔直电容 C_{g1} 进入放大模块, 放大器选用 OPA657; 放大后的信号通过节点 C 进入窗口比较器, 比较器由两个 TLV3501 和或非门 SN7402 组成, 窗口比较器的比较下限可以通过滑动变阻器调节; 窗口比较器输出高低电平信号, 信号经过节点 D 分别进入触发模块和计数模块, 节点 D 输出的信号触发双路单稳态多频振荡器 SN74LV123A, 生成两路固定的脉冲信号即淬灭脉冲和恢复脉冲, 两路脉冲的时序以及脉冲宽度可以通过芯片的外围电路来调制; 淬灭信号进入由 THS3091 组成淬灭模块, 信号进入后放大为 15.0 V 的脉冲信号, 该信号最终作用到 A 节点使 A 节点的电势迅速上升, APD 两端的电压下降, 完成淬灭; 之后恢复信号进入恢复模块, 该模块由 2N2369 组成, 恢复信号上升沿到来后, 2N2369 迅速导通, 此时节点 A 相当于连接到地, 被动模块恢复不再经过 R_Q 、

R_C 以实现快速恢复。

淬灭脉冲和恢复脉冲必须按照先淬灭后恢复的时序产生,淬灭时不应有恢复信号,所以时序非常重

要。模拟仿真的时序如图9所示,节点D信号触发的淬灭信号节点E和恢复信号节点F符合先淬灭后恢复的时序。



(a) 可见盲紫外光照射 (a) Visible blind UV irradiation

(b) 日盲光照射 (b) Solar-blind ultraviolet irradiation

图7 两种紫外光照射下计数率与暗计数随高压偏置 V_G 变化的关系

Fig.7 The relationship between the counts and V_G

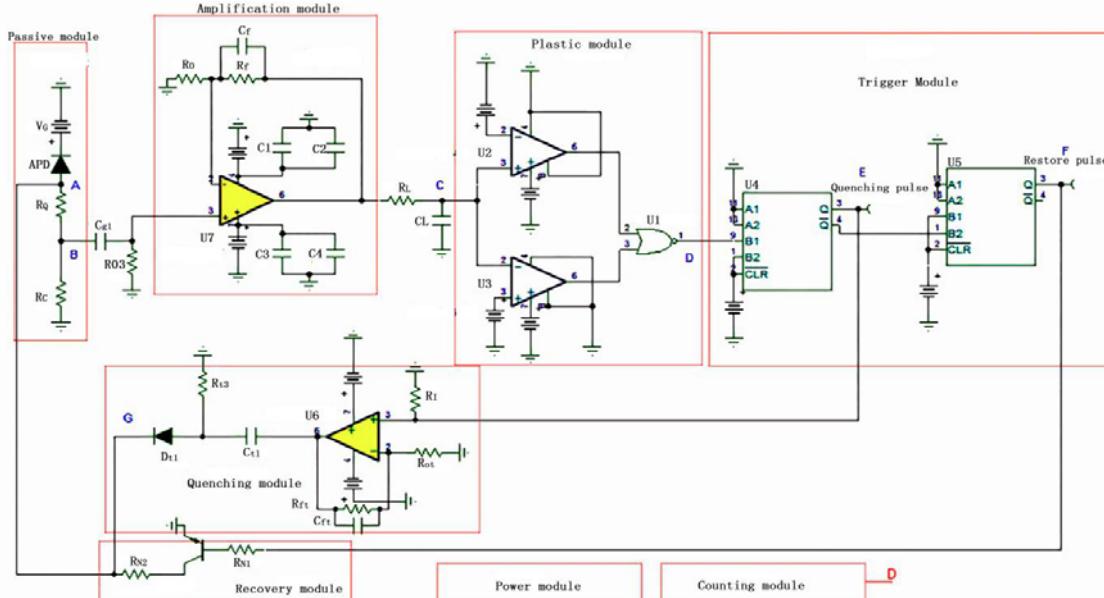


图8 主动盖革模式探测系统示意图

Fig.8 Block diagram of active mode systems

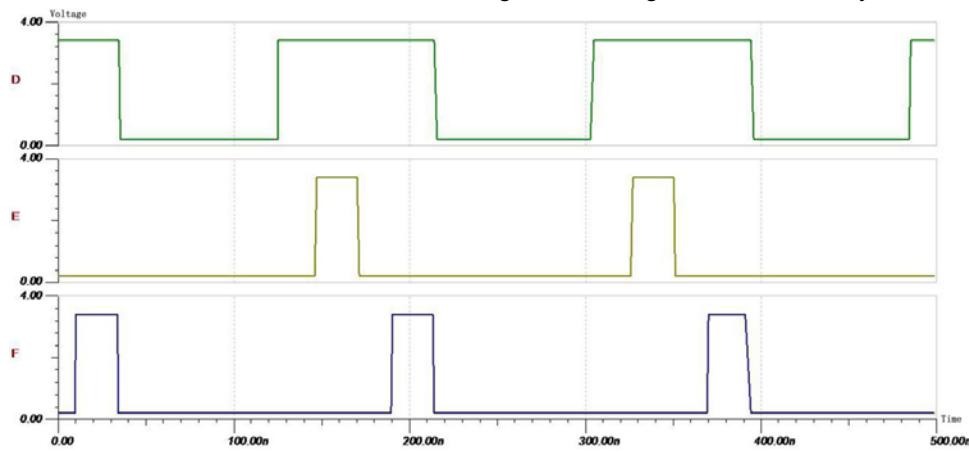


图9 时序仿真图

Fig.9 Simulation timing diagram

2.2 实验论证与结果分析

系统中各个模块中核心器件的延时时间(来源: 器件说明书)如表2所示, 器件总的延时时间为 $T_d = 30.1\text{ ns}$ 。系统中比较器窗口设定的比较下限为500.0 mV、上限为1.5 V; 高压偏置 V_G 为213.5 V。光源选用日盲紫外LED。假定淬灭脉冲宽度为 $T_Q = 50.0\text{ ns}$, 恢复脉冲宽度为 $T_C = 20.0\text{ ns}$, 雪崩时间为 $T_Q^* = 10.0\text{ ns}^{[1-2]}$, 则设想中的死时间为 $T_Q^* + T_d + T_Q + T_C = 110.1\text{ ns}$ 。

主动盖革模式探测系统的输出波形如图10所示: 曲线2、3、4分别为节点D、E、F输出的曲线, 2、3、4曲线中的脉冲波形虽然畸变, 但是仍然可以看出遵循仿真时序图9中的要求, 即先淬灭后恢复; 曲线1为系统在节点C的输出脉冲, 其中死时间为102.0 ns。相较于理论分析的死时间110.1 ns, 实际测得的死时间更短暂, 可能是节点E、F输出波形3、4发生

表2 器件延时时间表

Device	TLV3501	SN74LVC1G02	SN74LV123A	THS3091	2N2369
Delay/ns	4.5	3.6	5.0	8.0	10.0

3 结论

研制了适用于硅雪崩光电二极管的被动盖革模式探测系统: 获得了稳定可调的高压偏置电源, 纹波系数为 6.8×10^{-5} , 最高偏置可达300.0 V; 获得了在可见盲和日盲照射下被动盖革模式电路中APD的暗计数、光子计数和死时间, 其中死时间为1.0 μs , 光子计数上限为1.0 MHz; 确定了紫外光通信的最佳工作点。进一步的实验表明, 研制主动盖革模式探测系统可以缩短死时间、提高计数上限, 预计可满足初步的视频通信的要求。实验中研制的主动盖革模式探测系统将死时间从被动盖革模式系统中的1.0 μs 缩短为102.0 ns, 光子计数上限由1.0 MHz提升至9.8 MHz。

参考文献:

- [1] 王荣阳. 基于雪崩光电二极管的紫外通信系统研究[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2012.
- [2] 周扬. 盖革雪崩光电二极管探测器的淬火与恢复集成电路设计[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2010.
- [3] ZHOU Yang. Design of Quench and Recovery IC for Avalanche Photodiode Detector[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2010.
- [4] ZAYHOSKIAND J J, DILLI C. Diode-pumped passively Q-switched picoseconds microchip lasers[J]. Opt. Lett., 1994, 36(13): 1427-1429.
- [5] WEI Xianzheng. High speed InGaAs single photon detector design[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [6] 梁创, 廖静, 梁冰, 等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器[J]. 光子学报, 2000, 29(12): 1142-1147.
- [7] LIANG Chuang, LIAO Jing, LIANG Bing, et al. Silicon avalanche photodiode single photon detector[J]. Acta Sinica, 2000, 29(12): 1142-1147.
- [8] 权菊香, 张东升, 丁恩良. Si-APD单光子探测器的全主动抑制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 0043-0045.
- [9] QUAN Juxiang, ZHANG Dongsheng, DING Enliang. The active suppression of technical progress of Si-APD single photon detector[J]. Laser and Optoelectronics, 2006, 43(5): 0043-0045.
- [10] BROWN R G W, RIDLEY K D, RARITY J G. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements 1: passive quenching[J]. Applied Optics, 1986, 25(22): 4122-4126.
- [11] LEVINE B F, BETHEA C G. Single photon detection at 1.3 μm using a gated avalanche photodiode[J]. Appl. Phys. Lett., 1984, 44(5): 553.
- [12] ZAPPA F, LOTITO A, GIUDICE A C, et al. Active-quenching and active-reset circuit for single-photon avalanche detectors[J]. Journal of Solid-State Circuits, 2003, 38(7): 1298-1301.
- [13] 吕亮, 林延东. 相关光子符合计数的实现及修正[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1006-1012.
- [14] LV Liang, LIN Yandong. Realization and correction of optical precision instruments in line with relevant count photons[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1006-1012.
- [15] BRANNING D, BECKB M. An FPGA-based module for multi-photon coincidence counting[C]//Proc. of SPIE, 2012: 83750F-1.

了畸变, 使得淬灭脉冲和恢复脉冲时间变得更加短暂, 从而导致死时间变小。

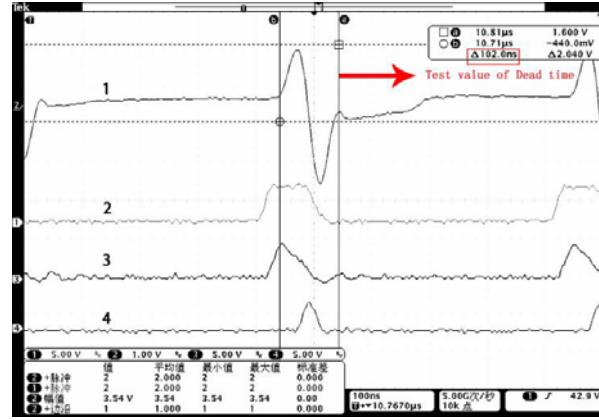


图10 主动盖革模式探测系统的输出波形

Fig. 10 Experimental results of active mode system

Table 2 Table of device delay