

# 单光子激光测距淬灭电路设计优化

陈雨<sup>1, 2, \*</sup>, 羊毅<sup>2</sup>, 郝培育<sup>2</sup>, 李尊<sup>2</sup>

1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000

2. 航空工业洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000

**摘要:**随着对激光测距测程要求的提高,以量子探测和概率统计理论为基础的单光子激光测距技术逐渐成为发展的新方向,单光子测距灵敏度高、测程远,探测器常用盖革模式下的雪崩光电二极管。盖革模式下,探测器一旦响应,电流成倍增大,需要加上淬灭电路。目前主动淬灭方式较为常用,但是噪声较大,电路设计复杂。优化设计了 GHz 的门控淬灭方式,将高频正弦信号加载在探测器两端,在正弦信号正半周期探测器处于盖革模式,负半周期淬灭探测器,同时门控信号的存在降低了电路的噪声。把主动淬灭电路和门控淬灭电路进行了研究与仿真,结果表明,正弦门控电路死时间短,噪声低,探测效率高,性能较优。设计了正弦门控电路。

**关键词:**单光子;主动淬灭电路;正弦门控淬灭电路;测距;激光

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.12.040

单光子测距测程远,能对微弱光信号产生很好的响应。盖革模式雪崩光电二极管(Geiger-Mode of Avalanche Photodiodes, GM-APD)的工作电压高于雪崩击穿电压,对入射光子高量子效率转换和极高雪崩内增益放大,响应信号(或噪声)后,为了保证正常工作,必须采用淬灭电路将 APD 的工作偏压降低到雪崩击穿电压以下,来清除所有的自由载流子,再将 APD 的工作偏压提高到雪崩击穿电压以上,为探测下一个光子做好准备。

20 世纪 60 年代, Haitz 等在 GM-APD 雪崩击穿工作原理的研究过程中提出了被动淬灭电路<sup>[1,2]</sup>,并提出了一个 GM-APD 电学模型。1975 年,意大利米兰理工大学 Cova 采用 Haitz 提出的结构,针对 GM-APD 被动式淬灭死时间长的缺点,提出了主动淬灭电路<sup>[3]</sup>。1981 年, Cova 证明了 GM-APD 皮秒级(ps)的分辨率及其应用在光学时间技术相关领域的潜力,提出门控式结合主动式的淬灭电路,缩短了 GM-APD 死时间<sup>[4]</sup>。

2006 年,日本大学的 Namekata 等首次提出了正弦门控滤波探测技术,该方案将正弦波门控信号的频率提高到

了 800MHz<sup>[5]</sup>,2009 年他们又实现了正弦波门控信号的频率 1.5GHz 的单光子探测器<sup>[6]</sup>。现有的门控技术主要应用于量子通信领域<sup>[7,8]</sup>,GM-APD 阵列传感检测已进入实用水平<sup>[9]</sup>。

目前,单光子激光测距常用主动淬灭电路,但是对于非合作目标主动淬灭电路死时间长且噪声较大,影响了探测效率的提高。本文首先分析了 APD 器件的等效电路模型,然后分析了主动淬灭模式电路、门控淬灭模式电路的工作原理并仿真,进行 GHz 门控淬灭模式电路的优化设计,门模式减小了噪声,短死时间提高了对非合作目标的测距能力。

## 1 基本概念

### 1.1 雪崩光电二极管(APD)

APD<sup>[10]</sup>是一种基于光电导效应和雪崩倍增效应的新型光电探测器件,与其他传统的光电传感器相比,具有较高的增益、较快的响应速度、较高的灵敏度、较小的体积、较轻的重量(质量)、方便使用等优点。APD 探测器的工作模式与所加反向偏置电压的关系如图 1 所示。

收稿日期: 2018-10-18; 录用日期: 2018-11-15

\* 通信作者. Tel.: 18903796082 E-mail: 1046979948@qq.com

引用格式: Chen Yu, Yang Yi, Hao Peiyu, et al. Optimization design of single photon laser range quenching circuit[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(12): 40-46. 陈雨, 羊毅, 郝培育, 等. 单光子激光测距淬灭电路设计优化[J]. 航空科学技术, 2018, 29(12): 40-46.

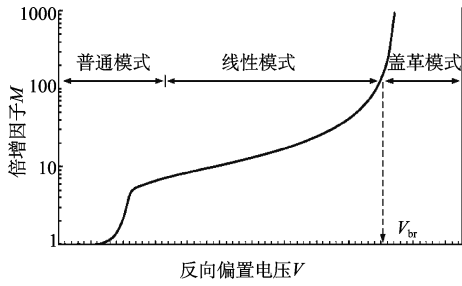


图1 APD探测器工作模式  
Fig.1 Working mode of APD

如果APD所加反向偏压继续增大,当所加偏压超过APD的临界雪崩电压 $V_{br}$ 时,反向偏压会在PN结耗尽区(高场区)内形成很强的电场,使得载流子的数量雪崩式倍增,称为“雪崩效应”,最终达到一个动态平衡,这种工作模式就是盖革模式。APD的增益系数 $M$ 与反向偏置电压 $V$ 的关系为:

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_B)^n} \quad (1)$$

式中: $V_B$ 为雪崩电压; $n$ 与PN结低掺杂区是N型或P型及入射信号光波长有关。当 $V$ 接近于 $V_B$ 时, $M$ 将趋近于无穷大,有利于提取单光子信号。

线性模式下,APD的增益不足以将单光子信号提取出来,因此,需要工作在盖革模式。盖革模式下,即弱光信号下,GM-APD输出离散的0.1信号,即数字信号。线性模式,即强光信号下,和盖革模式下的输出信号示意图如图2所示。

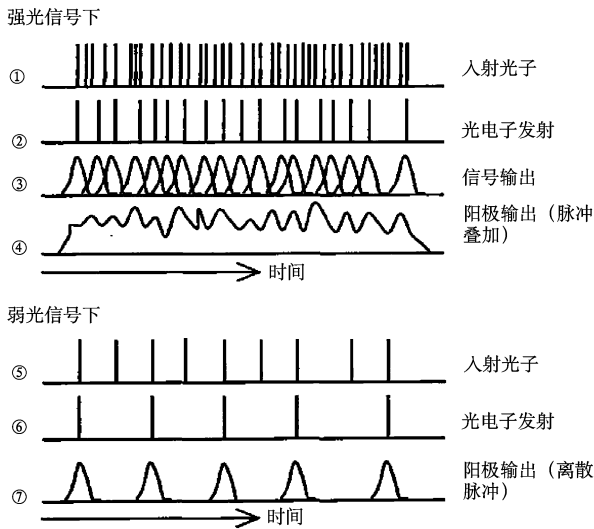


图2 强光和弱光信号下输出信号示意图

Fig.2 Schematic diagram of the output signal under strong and weak light signals

## 1.2 探测效率的优化建模

光子探测效率 (Photon Detection Efficiency, PDE) 为入射光子成功触发一次雪崩并被探测到的平均概率。

根据统计光学理论,在光子计数激光测距中,单光子探测器产生的光电子服从负二项分布。当入射的平均光电子数很小时,负二项分布进一步退化为泊松分布<sup>[11]</sup>。

在时间间隔探测到 $K$ 次光电事件( $K$ 个光子)的概率 $P$ 为:

$$P_d = 1 - P(K=0) = 1 - e^{-\bar{K}} \quad (2)$$

根据复杂环境下单光子测距时刻变化的大气传输特性、目标特性等特点,背景噪声对探测影响很大。把背景噪声对单光子探测的影响融入单光子探测模型中,建立GM-APD的探测模型,在一定的工作温度和过偏压下,噪声包括背景光噪声 $f_n$ 和探测器暗计数 $f_d$ 、淬灭电路引入门效率 $u_p$ 和死时间 $t_d$ 。 $n_s$ 表示某一次探测时入射的光子数,探测器在探测到第一个光子信号后,需要死时间 $t_d$ 来恢复工作状态,图3是探测模型图。

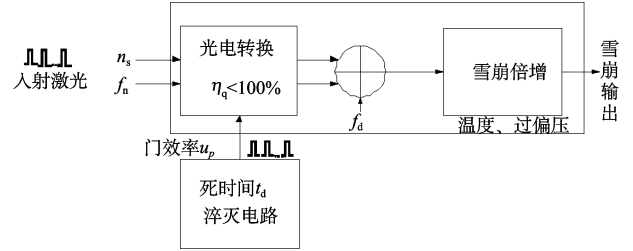


图3 GM-APD信号和噪声响应模型图

Fig.3 Model of GM-APD signal and noise response

盖革模式雪崩光电二极管的死时间受探测器响应和淬灭电路限制。探测器在探测到第一个光子信号后,需要一段时间来恢复工作状态,第一次探测到的光子信号会对后续信号的探测产生抑制作用,光子信号的探测概率会出现一定程度的衰减。考虑门控 $u_p$ 单位时间只通过门内的信号,探测概率加上死时间、探测器噪声、门效率的衰减系数修正为<sup>[12]</sup>:

$$P_d = e^{-t_d \cdot (n_q \cdot f_n \cdot u_p + f_d)} (1 - e^{-n_q \cdot n_s \cdot u_p}) \quad (3)$$

## 1.3 淬灭电路

淬灭电路设计的优劣,对于单光子探测器的探测效率和精准度起着关键作用<sup>[13]</sup>。完成一次淬灭需要三个步骤:(1) 感应雪崩信号的同时输出TTL脉冲电平信号;(2) 脉冲信号控制APD两端的偏置电压,使其低于雪崩击穿电压,淬灭雪崩;(3) 重新恢复偏置电压,为下一个光子的到来做好

准备。常见的淬灭方式有三种:被动淬灭、主动淬灭和门控淬灭。

### 1.3.1 APD 等效电路模型

根据 Core 提出的模型,对 APD 建立等效电路模型,如图 4 所示。

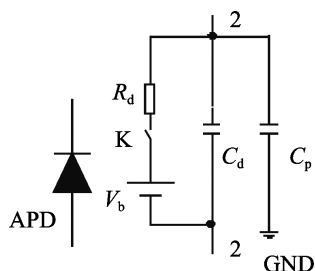


图 4 APD 等效电路模型

Fig.4 Equivalent circuit model of APD

APD 等效电路模型为一个光控开关与电压源的串联,光控开关模拟有无光子入射,有光子入射开关闭合,电压源为 APD 雪崩电压值, $R_d$  为 APD 等效内阻, $C_d$  为 APD 的结电容, $C_p$  为分布电容,它的值一般为皮法量级。

### 1.3.2 主动淬灭

主动淬灭的工作原理如图 5 所示。

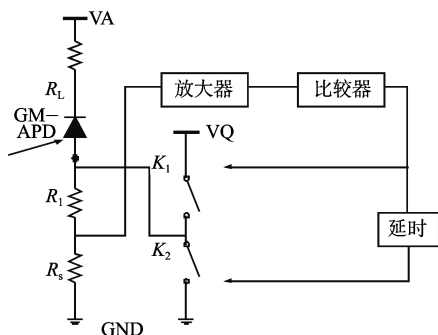


图 5 主动淬灭工作原理图

Fig.5 Working principle diagram of active quenching

探测器感应到光子之前, $K_1$ 、 $K_2$  都处于关断状态,探测器两端偏压处于雪崩状态。当探测器感应到光子之后,产生光电流,经过 I-V 转换和放大,整形之后,控制  $K_1$  闭合,则加载在探测器两端的偏压降低,实现了雪崩的淬灭, $K_1$  重新打开,经过一段时间的延迟之后,控制  $K_2$  闭合,探测器两端电压重新恢复至雪崩偏压,为下一个光子的到来做好准备。主动淬灭利用了反馈的优势,当探测器检测到雪崩信号后立刻反馈到 APD 的驱动电压上。

### 1.3.3 门控淬灭

很多时间相关性测量及暗计数率较高的 GM-APD 需要工作在“门控模式”下,即工作在门控脉冲的控制下,探测

器仅在门控脉冲到来时保持活跃。这就要求探测器的工作偏压在门控脉冲有效期间处于雪崩电压阈值以上而门控关闭后工作偏压迅速降低到阈值以下<sup>[14, 15]</sup>。当光子入射门控关闭时,电路没有有效输出。采用门控模式可以有效降低暗计数,而且可以降低探测器功耗、延长探测器寿命,有效抑制后脉冲。

由于 APD 结电容的存在,门脉冲在通过 APD 时,会在门脉冲的上升沿产生一个正向的充电脉冲,而在门脉冲的下降沿产生一个负向的放电脉冲,并且这两个充放电脉冲的幅值很大,称为尖峰噪声,这就给雪崩信号的提取带来了很大的困难。常用以下方法:

#### (1) 差分电路法

将电压平分分为两路分别加在 APD 和结电容的两端,产生相同的尖峰噪声,将输出信号做差分运算,消除噪声。

#### (2) 同轴电缆反射法

用两根完全相同的电缆将信号延时后再差分。

#### (3) 双 APD 平衡法

采用两个相同型号的 APD 搭建探测电路,在输出做差分运算。改进方法将其中一个 APD 改成可调电容,称为可调电容平衡法。

#### (4) 负脉冲检测法

通过检测 APD 输出信号负脉冲的有无知道雪崩是否发生。

#### (5) 正弦波脉冲法

用正弦波作为门电压,将输出信号通过带阻滤波器来抑制尖峰噪声,如图 6 所示。

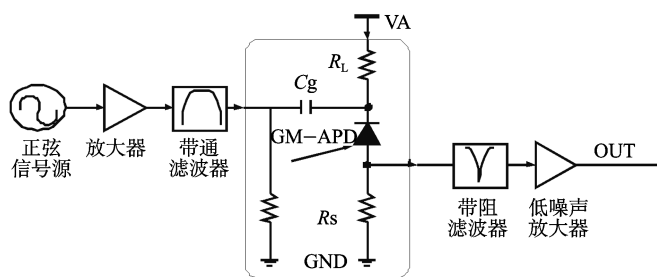


图 6 门控淬灭工作原理图

Fig.6 Working principle diagram of gate control quenching

使用正弦门控淬灭电路,只有门内的信号可以有效探测,存在门效率的问题,计算正弦门的门效率,计算原理如图 7 所示, $V_{bias}$  为正弦波所处的基准电压, $V_{pp}$  为正弦信号峰值。 $t_1$  和  $t_2$  为正弦信号到达雪崩电压  $V_b$  的时间, $t_2-t_1$  即为门有效的时间。

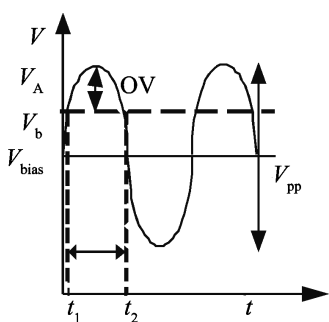


图 7 正弦门效率计算原理

Fig.7 The principle of calculating the efficiency of sine gate

门效率表达式为：

$$u_p = \frac{1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{V_{pp} - 2OV}{V_{pp}}}{2} \quad (4)$$

## 2 设计实例

将主动淬灭电路和正弦门控淬灭电路进行对比。

### 2.1 主动淬灭

用 Capture 的 Pspice 仿真, 仿真电路图及仿真波形图如图 8 和图 9 所示。

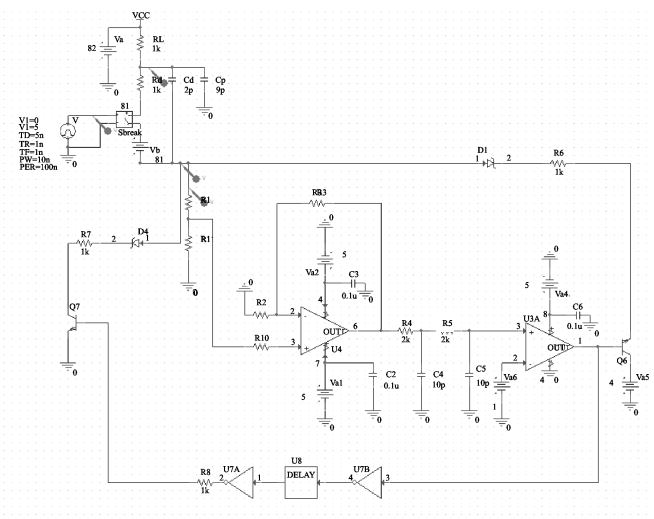


图 8 主动淬灭电路原理图

Fig.8 Schematic diagram of active quenching circuit

电路原理图将电压加载在 APD 等效模型上, 首先通过放大器将信号放大, 再通过比较器对信号进行提取, 一路信号通过三极管反馈至 GM-APD 两端, 降低雪崩电压, 淬灭信号; 一路信号通过三极管反馈至 GM-APD 两端, 提高雪崩电压, 使电路恢复。

可以看出, GM-APD 两端电压随着入射光脉冲的周期在线性与盖革模式下切换, 输出信号是清晰的脉冲, 没有叠

加的噪声信号, 信号好提取。从电压的恢复信号可以看出, 淬灭时间大约在 20ns 左右, 表现出很好的性能。

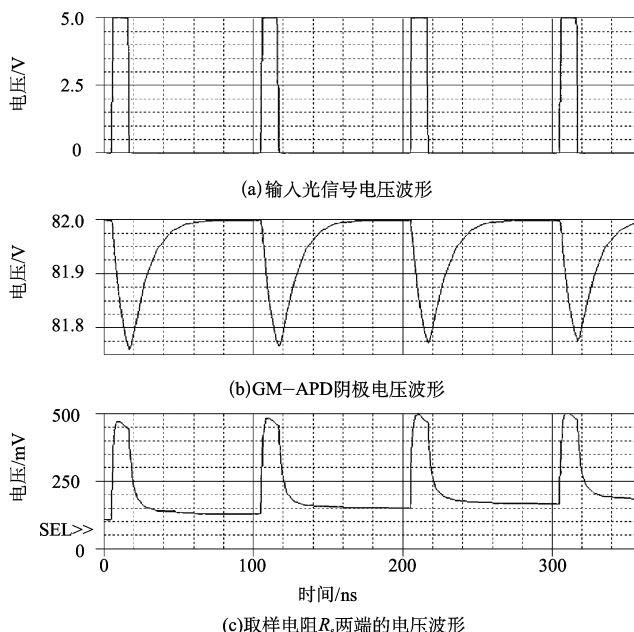


图 9 主动淬灭输出信号示意图

Fig.9 Schematic diagram of active quenching output signal

仿真恢复时间在 20ns 左右, 门控效率为 1, 代入式 (3) 中, 可以得到较高的探测效率, 证明这个电路还是表现了很好的性能。

### 2.2 门控淬灭

Capture 的 Pspice 仿真电路原理图及仿真波形图如图 10 和图 11 所示。输入信号参数门信号为正弦信号, 幅度为 1.2V, 频率为 0.01GHz。

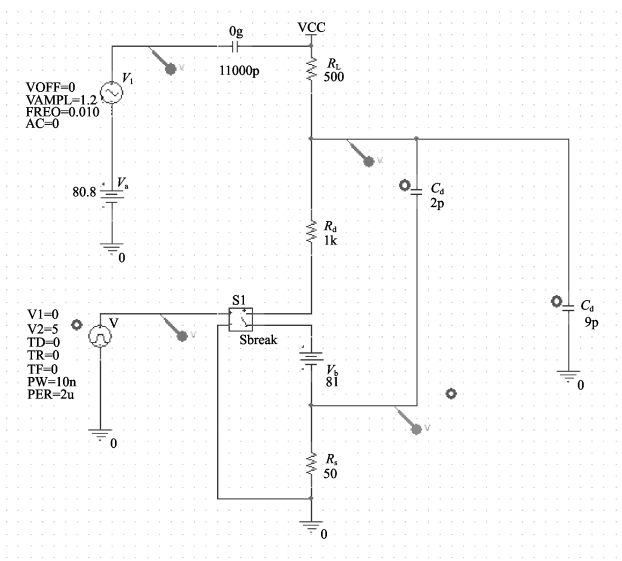


图 10 门控淬灭电路原理图

Fig.10 Schematic diagram of gate control quenching circuit

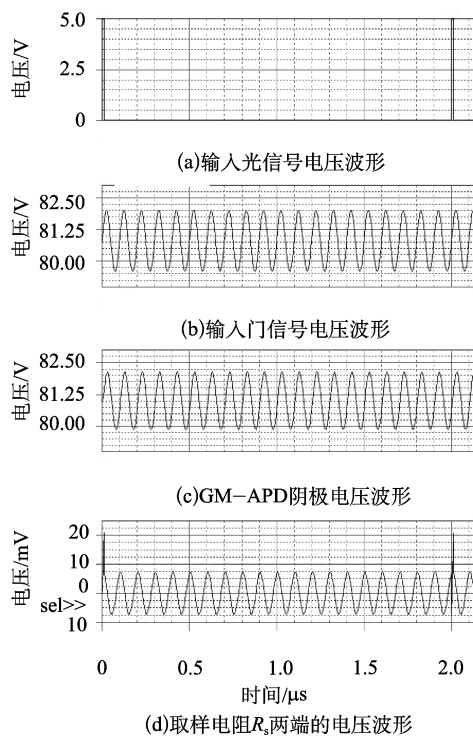


图 11 门控淬灭输出信号示意图

Fig.11 Schematic diagram of gate control quenching output signal

可以看出, GM-APD 两端电压变化随着正弦门控的变化而变化,输出信号叠加了正弦波形,需要在后续通过滤波器进行滤除。

幅度不变,设置正弦信号频率为 1GHz,对于输入的带有高频正弦信号的波形进行滤波,得到滤波后的雪崩信号,如所示图 12 所示。

建立的正弦门控淬灭仿真模型可以从高频正弦波中提取频率较低雪崩信号,死时间较短,可以满足达到准连续探测的需要,死时间 15ns。表 1 是门控淬灭与主动淬灭的对比。

表 1 本设计中门控淬灭与主动淬灭对比

Table 1 Comparison between gate control quenching and active quenching in the design

| 性能      | 主动淬灭     | 门控淬灭                |
|---------|----------|---------------------|
| 外加信号    | 无        | 1GHz 正弦门控           |
| 门效率     | 1        | $\leq 0.45$         |
| 死时间 /ns | 20       | 15                  |
| 复杂度     | 反馈电路设计复杂 | 高频正弦产生复杂;<br>后续滤波复杂 |

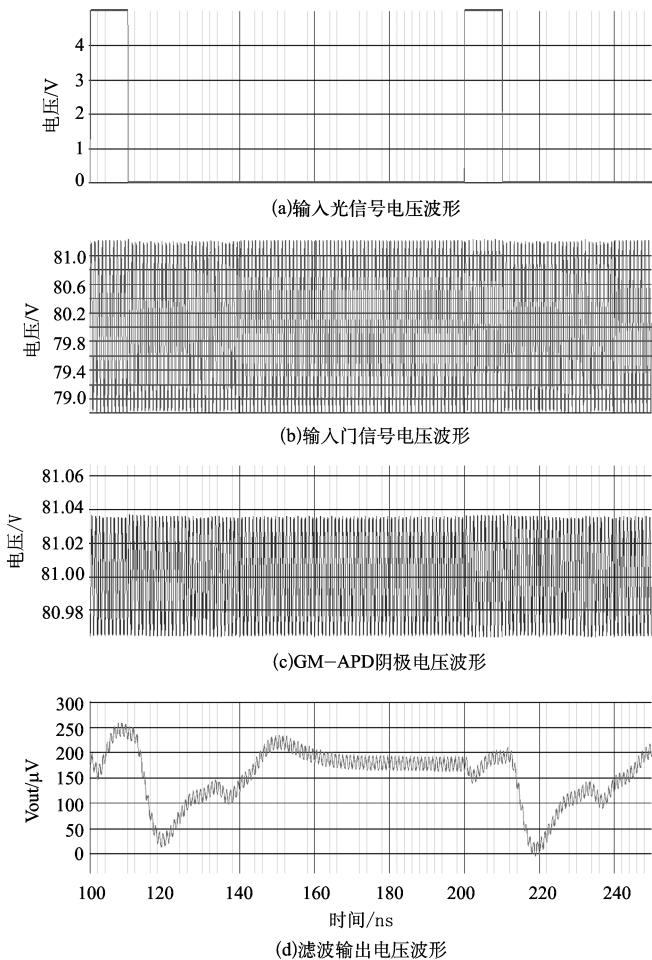


图 12 高频门控淬灭输出信号示意图

Fig.12 Schematic diagram of high frequency gate control quenching output signal

### 3 测试

在实际电路板上测试,在暗室环境下,APD 接收到光子,经过正弦门控淬灭后,滤波整形输出,测得电路死时间为 17ns。

### 4 结论

探测器淬灭电路的设计对于提高单光子电路探测能力非常重要。通过对主动淬灭死时间长、噪声大、不利于后续信号的提取问题的分析,对比了目前淬灭电路的发展现状,最终选取了高频正弦门控淬灭电路,减小了死时间和噪声的问题。

但是目前国内对于单光子探测技术的研究还不够深刻,距离国外先进技术有一定的差距,需要对门控淬灭方式进一步研究,优良的门控淬灭电路可以进一步减小死时间,

提高探测效率,同时对于探测器件结构、外围控制电路、探测的优化还有广泛的探索空间。

AST

### 参考文献

- [1] Haitz R H. Model for the electrical behavior of microplasma[J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35 (5): 1370-1376.
- [2] Haitz R H. Mechanisms contributing to the noise pulse rate of avalanche diodes[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36 (10): 3123-3131.
- [3] Cova S, Longoni A, Andreoni A. Towards picoseconds resolution with single-photon avalanche diodes[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52 (3): 408-412.
- [4] Cova S, Longoni A, Ripamonti G. Active-quenching and gating circuits for single-photon avalanche diodes (GM-APDs) [J]. IEEE Transactions Nuclear Science, 1982, 29 (1): 599-601.
- [5] Namekata N, Sasamori S, Inoue S. 800MHz single-photon detection at 1550nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating[J]. Optics Express, 2006, 14 (21): 10043.
- [6] Namekata N, Adachi S, Inoue S. 1.5GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. Optics Express, 2009, 17 (8): 6275-6282.
- [7] Bethune D S, Risk W P. An autocompensating fiber-optic quantum cryptography system[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36 (3): 209-210.
- [8] Tomita A, Nakamura K. Balanced, gated-mode photon detector for quantum-bit discrimination at 1550nm[J]. Optics Letters, 2002, 27 (20): 1827-1829.
- [9] Niclass C, Favi C, Kluter T, et al. A  $128 \times 128$  single-photon image sensor with column-level 10-bit time-to-digital converter array[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43 (12): 2977-2989.
- [10] Namekata N, Adachi S, Inoue S. 2GHz single-photon detection at telecommunication wavelengths using sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode[J]. Optics Express, 2009, 17 (8): 6275-6282.
- [11] 吕奋斗. 嵌入式 APD 微弱光信号探测系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- [12] 罗韩君, 元秀华, 周仁龙. 盖革模式 APD 激光雷达探测性能与虚警抑制研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44 (2): 175-179. Luo Hanjun, Yuan Xiuhua, Zhou Renlong. Geiger mode APD lidar detection performance and false alarm suppression research [J]. Laser and Infrared, 2014, 44 (2): 175-179. (in Chinese)
- [13] 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (18): 5186-5190. Hou Libing, Huang Genghua, Kuang Yaowu, et al. Photon counting laser ranging technology research [J]. Science and Technology and Engineering, 2013, 13 (18): 5186-5190. (in Chinese)
- [14] 张常年, 张栎存, 康小麓. 基于 APD 线列的单光子探测计数研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 184-187. Zhang Changnian, Zhang Licun, Kang Xiaolu. Research on single photon detection and counting based on APD line array [J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24 (9): 184-187. (in Chinese)
- [15] 袁俊, 吴广国, 张国青, 等. GM-APD 单光子探测器 SPICE 电路模型的建立与仿真研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29 (1): 62-68. Yuan Jun, Wu Guangguo, Zhang Guoqing, et al. The establishment and simulation of the SPICE circuit model of GM-APD single photon detector [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2009, 29 (1): 62-68. (in Chinese)

### 作者简介

陈雨 (1992- ) 女, 硕士。主要研究方向: 激光测距技术。

Tel: 18903796082

E-mail: 1046979948@qq.com

羊毅 (1965- ) 女, 研究员。主要研究方向: 光电探测系统。

郝培育 (1981- ) 男, 高级工程师。主要研究方向: 激光测距技术。

李尊 (1984- ) 男, 工程师。主要研究方向: 激光测距技术。

## Optimization Design of Single Photon Laser Range Quenching Circuit

Chen Yu<sup>1,2,\*</sup>, Yang Yi<sup>2</sup>, Hao Peiyu<sup>2</sup>, Li Zun<sup>2</sup>

1. *Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China*

2. *AVIC Luoyang Research Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang 471000, China*

**Abstract:** With the improvement of the requirements for laser range measurement, single photon laser ranging technology based on quantum detection and probability statistics theory has gradually become a new direction of development. Single photon laser ranging has high sensitivity and far range, and avalanche photodiode in Geiger mode is often used. In the Geiger mode, once the detector responds, the current increases exponentially. If an effective quenching circuit is not added, it will easily damage the detector. At present, the active quenching method is more commonly used, but the noise is large and the circuit design is complex. The mode of gate control quenching of GHz is optimized. The high frequency sinusoidal signal is loaded at both ends of the detector, and the detector is in the Geiger mode by the positive half cycle while quenched by the negative half cycle. At the same time, the existence of the gated signal reduces the noise of the circuit. In this paper, the active quenching circuit and gate control quenching circuit were studied and simulated. The simulation results show that the sinusoidal gate control circuit has better performance. Sinusoidal gate control circuit is designed, and good performance is shown.

**Key Words:** single photon; active quenching circuit; sinusoidal gate control quenching circuit; ranging; laser

---

**Received:** 2018-10-18;      **Accepted:** 2018-11-15

**\*Corresponding author.** Tel.: 18903796082      E-mail: 1046979948@qq.com