

〈系统与amp;设计〉

盖革模式雪崩光电二极管的场效应管淬灭电路设计

施向东, 赖晓艳

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 是一种常用于激光探测领域的光敏元件。本文针对盖革模式雪崩光电二极管 (Geiger Mode-Avalanche Photodiode, Gm-APD) 工作时发生的雪崩效应, 设计了一种场效应管淬灭电路 (Field Effect Transistor Quenching Circuit)。首先, 针对 Gm-APD 器件的特性建立了 Gm-APD 的电学模型。其次, 在此模型的基础上, 设计并仿真验证了场效应管淬灭电路, 实现了对 Gm-APD 的快速淬灭。结果表明, 本文设计的场效应管淬灭电路淬灭速度快、死时间短、性能较优, 淬灭时间和死时间分别为 21.026 ns 和 16.5 ns, 满足激光测距成像的应用需求。

关键词: 盖革模式; APD; 场效应管淬灭电路; 激光测距成像

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)01-0056-04

Design of Field-Effect Transistor Quenching Circuit for Geiger-Mode Avalanche Photodiodes

SHI Xiangdong, LAI Xiaoyan

(Avic China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: The avalanche photodiode (APD) is a photosensitive component commonly used in devices employed in the field of laser detection. In this study, a field-effect transistor quenching circuit is designed for a Geiger-mode (Gm)-avalanche photodiode for detecting avalanche effects. First, a circuit model of a Gm-APD was established based on the characteristics of a traditional Gm-APD device. Second, based on this model, a field-effect transistor quenching circuit was simulated to confirm the rapid quenching of the Gm-APD. Results indicated that the field-effect transistor quenching circuit in this study exhibited a high quenching speed, a short dead time, and improved performance. The quenching and death times were 21.026 and 16.5 ns, respectively, which meet the application requirements of laser ranging imaging.

Key words: Geiger mode, APD, field effect transistor quenching circuit, laser ranging imaging

0 引言

信息技术自 20 世纪 70 年代以来发展迅速, 电子光学技术与信息通信、物理等学科交汇融合, 使得许多有价值的新技术蓬勃发展, 光子计数成像检测技术就是其中之一^[1]。光电探测器是光子计数成像检测技术中非常重要的一部分。现今, 使用最广泛的光电探测器件主要为光电倍增管 (photo multiplier tube, PMT) 和雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD)^[2]。其中 APD 具有全固态结构, 探测灵敏度高, 在高增益状态下信噪比仍然可以保持良好, 故而在光子计数成像检测领域被广泛使用。

APD 是一种具有内光电效应的光电探测器, 拥有放大内部增益的功能, 当 APD 工作在反偏电压下时, 反偏电压越高, 器件内部耗尽层中的电场强度会变得越大, 电流增益也会变得越高, 故而 APD 的灵敏度也就越高^[3]。在工作过程中, 当光子进入到 APD 后, 因发生光电效应, APD 内部将会产生电荷载流子, 产生的光生载流子在电场加速下可获得充足的能量与原子晶格产生碰撞并产生电离效应, 电离碰撞效应发生后, 产生电子-空穴对, 随后产生的“电子-空穴对”在 APD 内部耗尽层的电场下被极速分离, 进而重复产生新的电离碰撞效应, 如此重复, 从而触发载流子的雪崩效应, 产生可观的雪崩电流^[3]。APD 有线性性和

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2021-01-07.

作者简介: 施向东 (1970-), 男, 洛阳人, 政工师, 主要研究方向为红外对射技术防范研究。E-mail: 326330715@qq.com。

盖革两种工作模式, 如图1所示。工作在盖革模式下的 APD (Geiger Mode-Avalanche Photodiode , Gm-APD) 反偏电压高于雪崩电压, 这时单光子就可触发 APD 的雪崩效应并产生雪崩电流, 具有极高的灵敏度。所以 Gm-APD 在激光测距成像领域越来越受到重视。

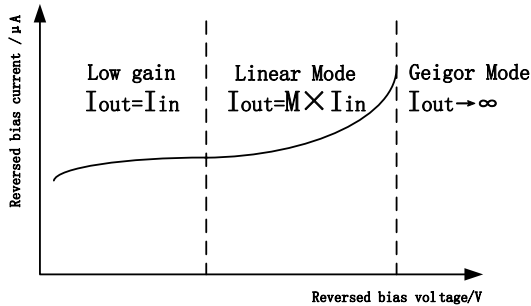


图1 APD 反偏电压/电流关系图

Fig.1 APD inverse voltage/current diagram

当 APD 工作于盖革模式时, 发生雪崩效应后器件内部的雪崩电流极高, 如不及时降低将会有损坏器件的风险, 所以需要有效的淬灭电路来进行雪崩电流的淬灭。因此, 拥有一个快速、有效的淬灭电路显得格外重要。

1964年, Haitz 等人在研究 Gm-APD 的雪崩击穿工作原理时, 建立了 Gm-APD 的电学模型, 并提出设计了被动淬灭电路^[4-5]。1975年, 意大利米兰理工大学的 Cova 针对被动淬灭电路死时间过长的缺点, 把 Haitz 提出的被动淬灭电路进行了改进, 提出设计了 Gm-APD 的主动淬灭电路^[6]。本文在此基础上进行深入研究, 提出设计了一种场效应管淬灭电路 (Field Effect Transistor Quenching Circuit), 在淬灭速度和死时间方面有了显著提升。

1 Gm-APD 模型的建立

1.1 Gm-APD 光子触发模型

为了检验本文所设计淬灭电路的准确性、有效性, 需要建立 Gm-APD 的电学模型来模拟光子触发的过程。本文采用意大利米兰理工大学 Haitz 等人所设计的 Gm-APD 模型^[7], 如图2所示。V₁ 代表 Gm-APD 的击穿电压, R₁ 代表电荷区电阻, R₂ 代表 Gm-APD 内部电阻, C₁ 代表阳极到衬底的散杂电容, C₂ 代表阴极到衬底的散杂电容。

使用 Multisim 电路仿真软件对 Gm-APD 光子触发模型进行仿真验证, 仿真结果如图3所示。可以看到, 此模型完整地呈现出了 Gm-APD 由光子触发并发生雪崩效应的工作模式, 可以满足进一步研究的需要。

1.2 被动淬灭电路及主动淬灭电路验证

被动淬灭方式就是把一个大数值的电阻与 Gm-APD 串联, 由于电阻的分压原理可以使 Gm-APD 的雪崩电压降低, 使 Gm-APD 的反偏电压低于雪崩电压, 停止 Gm-APD 内部电荷载流子以及电子-空穴对的快速产生, 实现雪崩电压的淬灭。使用 Multisim 电路仿真软件对被动淬灭电路以及 Gm-APD 电学模型进行验证, 被动淬灭电路的原理图如图4所示。

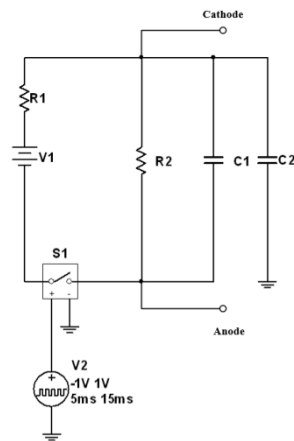


图2 Gm-APD 电学模型

Fig.2 Gm-APD electrical model

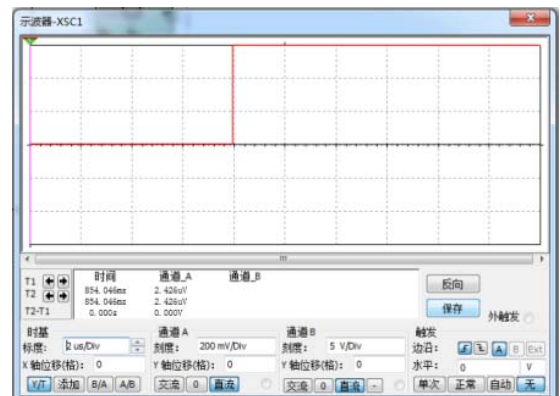


图3 Gm-APD 光子触发模型仿真波形

Fig.3 Gm-APD photon trigger model simulation waveform

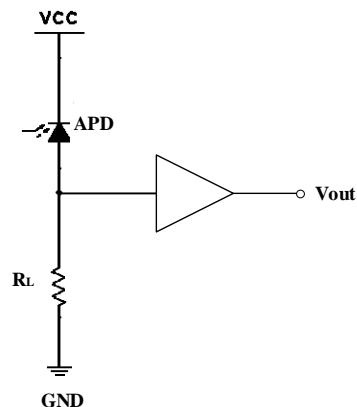


图4 Gm-APD 被动淬灭电路原理图

Fig.4 Gm-APD Passive quenching circuit schematic

淬灭时间可由公式(1)算出^[8]:

$$T = (C_1 + C_2)R_3 \parallel R_1 \approx (C_1 + C_2)R_1 \quad (1)$$

根据公式(1)算出被动淬灭电路的淬灭时间大约为 1.2 μs。用示波器观察 Gm-APD 雪崩电压的变化, 具体波形图如图 5 所示。可以观察到此波形准确地呈现出了 Gm-APD 先雪崩再淬灭这一过程, 可以测出淬灭时间为 1.231 μs, 死时间为 422.4 ns, 和理论值相符。由此可看出前文所建立的 Gm-APD 电学模型可以满足后续测试的需求。

被动淬灭电路有一个缺陷, 就是串联的大数值淬灭电阻最大不能超过几百 kΩ, 因为如果淬灭电阻过大, 会造成 Gm-APD 的死时间过长, 导致无法快速进行下一次光子的探测。因此, 被动淬灭电路的淬灭时间受到了限制, 无法继续降低, 难以满足快速检测的应用需求。

为了克服被动淬灭电路的缺点, Cova 等人^[6]在被动淬灭电路的基础上设计了主动淬灭电路。主动淬灭方式就是在被动淬灭方式的基础上增加了反馈的回路, 并且通过控制开关来对雪崩电压进行淬灭, 主动淬灭电路的原理图和仿真波形图如图 6 所示。通过仿

真波形可看出主动淬灭方式的淬灭时间为 52.2 ns, 死时间为 20 ns。

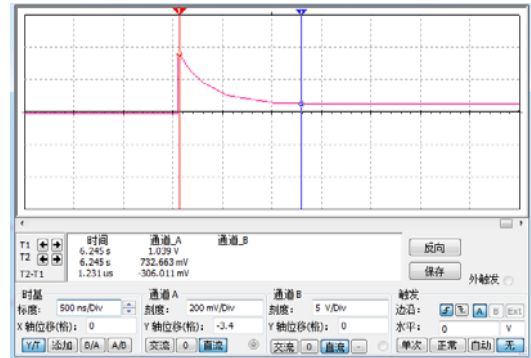
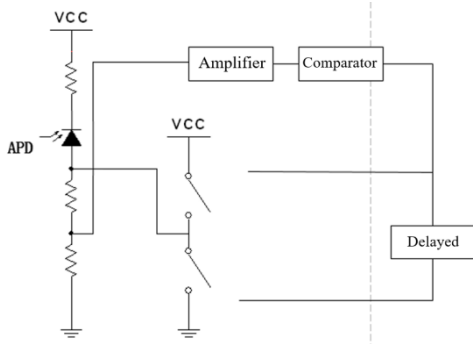


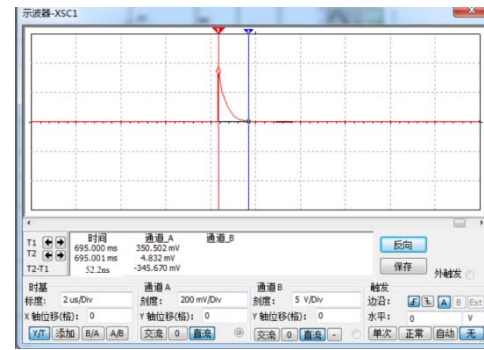
图 5 Gm-APD 被动淬灭电路雪崩电压变化波形图
Fig.5 Gm-APD passive quenching circuit avalanche voltage change waveform

2 场效应管淬灭电路

本文在主动淬灭电路的基础上进一步研究, 利用场效应管的电压控制特性, 把主动与门控淬灭电路相结合, 设计了一种场效应管淬灭电路, 场效应管淬灭电路电路图以及等效模型如图 7 所示。



(a) 主动淬灭电路的原理图

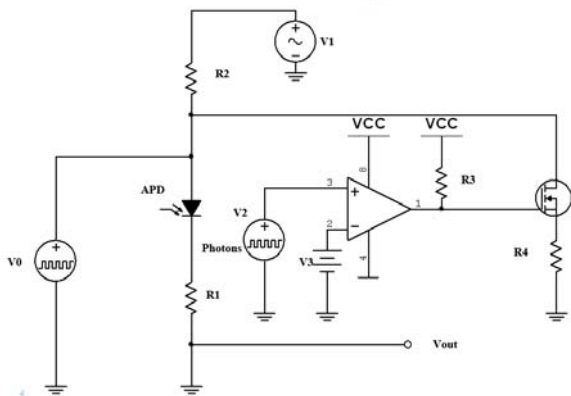


(b) Gm-APD 主动淬灭电路雪崩电压变化波形图

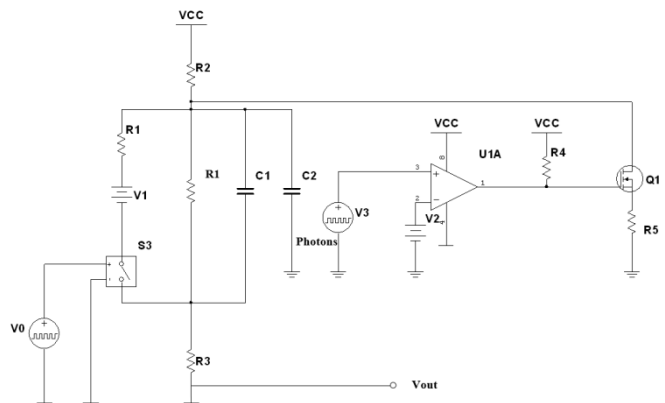
(a) Schematic of active quenching circuit (b) Gm-APD passive quenching circuit avalanche voltage change waveform

图 6 主动淬灭电路的原理图和仿真波形图

Fig.6 Schematic diagram and simulation waveform of active quenching circuit



(a) 场效应管淬灭电路电路图



(b) 场效应管淬灭电路电路等效模型

(a) Circuit diagram of field effect Transistor quenching circuit (b) Equivalent circuit model of field effect transistor quenching circuit

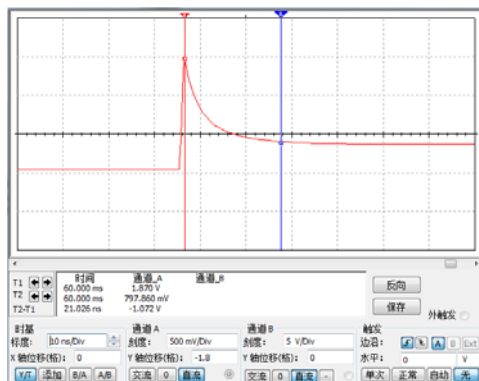
图 7 场效应管淬灭电路电路图以及等效模型

Fig.7 Circuit diagram and equivalent model of field effect transistor quenching circuit

本文所设计的场效应管淬灭电路在融合了被动淬灭电路的淬灭电阻以及主动淬灭电路的反馈回路的基础上, 通过加入场效应管, 利用其电压控制的功能, 使淬灭时间以及死时间得到了进一步提高。在所设计的淬灭电路中, 场效应管由于在栅极(G管脚)接有负偏压(-U_G), 在G管脚的左近处构成耗尽层。当负偏压(-U_G)的绝对值增大时, 耗尽层增大、沟道减小、漏极(D管脚)的电流I_D减小。当负偏压(-U_G)的绝对值减小时, 耗尽层减小、沟道增大、漏极(D管脚)电流I_D增大。可见, 漏极(D管脚)的电流I_D受栅极(G管脚)的电压控制, 可看出场效应管是一种可以控制电压的器件。利用场效应管可以控制电压的特点设计出同时具有主动和门控特性的场效应管淬灭电路。本次设计所使用的是增强型N沟道的MOS场效应管, 由图7(a)看出, 控制电压和参考电压分别从电压比较器(采用LM358电压比较器)的同相输入端和反相输入端进入, 电压比较器的电源接正12V和地, 电压比较器的输出经过上拉电阻上拉后接场效应管的G管脚, 如果控制电压比参考电压高, 则控制场效应管管导通输出电流。此时如果Gm-APD雪崩产生雪崩电流(通过比较器鉴别是否发生雪崩), 则通过场效应管控制电压降低, 达到雪崩淬灭的作用。淬灭时间可由如公式(2)算出:

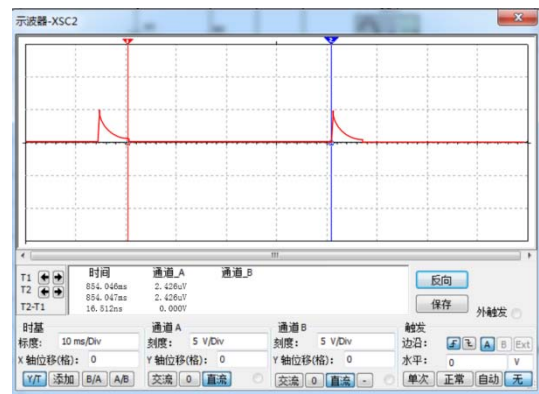
$$T = (C_1 + C_2) \frac{R_3}{R_1 + R_3 + R_5} U_G \quad (2)$$

场效应管淬灭电路的等效模型如图7(b)所示, 当Gm-APD接收到光子后, 因光电效应而产生的电荷载流子在电场的加速下碰撞产生电子-空穴对, 发生雪崩效应、电压急剧升高, 通过与参考电压通过电压比较器, 鉴别出确实发生雪崩效应, 然后由场效应管控制电压降低, 实现雪崩淬灭。使用Multisim电路仿真软件进行仿真验证, 此过程Gm-APD的输出波形如图8所示。



(a) Gm-APD 场效应管淬灭电路淬灭时间波形图

(a) Waveform of quenching time of GM-APD field effect transistor quenching circuit



(b) Gm-APD 场效应管淬灭电路死时间波形图

(b) Dead time waveform of GM-APD field effect transistor quenching circuit

图8 Gm-APD 场效应管淬灭电路雪崩电压变化波形图
Fig.8 Gm-APD field effect transistor quenching circuit avalanche voltage change waveform

由图8可得, 本文所设计的场效应管淬灭电路的淬灭时间为21.026 ns, 死时间为16.5 ns, 与理论值相符。与常用的被动、主动淬灭方式的淬灭时间相比较, 如表1所示, 淬灭时间以及死时间显著缩短。

表1 淬灭时间比较

Table 1 Quenching time comparison

Quenching mode	Quenching time/ns	Dead time/ns
Passive quenching	1231	422.4
Active quenching	52.2	20
Field effect transistor quenching	21.026	16.5

3 结论

本文建立了Gm-APD的电学模型, 在此基础上设计并仿真验证了场效应管淬灭电路, 成功实现了对发生雪崩效应的Gm-APD的快速淬灭。结果表明, 本文所设计的场效应管淬灭电路较现今常用的被动、主动淬灭方式的淬灭时间以及死时间显著缩短, 分别可达21.026 ns和16.5 ns, 满足激光测距、成像的实用化需求。

参考文献:

[1] 王灿. 面向雪崩光电二极管的光子计数读出电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG Can. Design of Photon Counting Readout Integrated Circuit for Avalanche Photodiode[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

(下转第78页)