光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023092701

单光子雪崩二极管 SPICE 仿真模型的建立和应用

匡　华[1,2]，鞠国豪[1]，徐　星[1]，程正喜[1*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 单光子雪崩二极管(SPAD)作为一种高效的光子探测器件被广泛应用于量子通信和三维成像等领域。在 Cadence 中建立了一个 SPAD 的 Spice 模型，通过 Verilog-A 语言，采用两个 e 指数函数的组合，以连续函数的方式描述了 SPAD 在盖革模式区等效电阻的动态变化。这两个 e 指数函数分别体现了高阻区和低阻区的等效电阻特性，解决了分段电阻模型仿真不收敛的问题。该 Spice 模型模拟了 SPAD 器件在“接收光子-雪崩产生脉冲-淬灭-复位”工作过程中的动态特性和 SPAD 从正偏到二次击穿的静态 *I-V* 特性。将其应用到 4 种不同淬灭电路的仿真中，验证了该模型的有效性和稳定性。

关键词： 单光子雪崩二极管；Spice 模型；Cadence 仿真；淬灭电路；门控模式

中图分类号： TN364.2　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0042－07

A SPICE Simulation Model for Single-Photon Avalanche Diodes with Application in Quenching Circuits

KUANG Hua[1,2], JU Guohao[1], XU Xing[1], CHENG Zhengxi[1]

(1. Key Lab. of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Single-photon avalanche diodes (SPADs) have found widespread application as efficient photon detection devices in quantum communication and 3D imaging technologies. In this study, a simulation program with an integrated circuit emphasis (SPICE) model was established for SPAD within the Cadence environment. Employing the Verilog-A language, a combination of two exponential functions was utilized to continuously describe the dynamic variation in the equivalent resistance of the SPAD in the Geiger mode region. These two exponential functions encompass the equivalent resistance characteristics of the high- and low-resistance regions, addressing the issue of non-convergence in the segmented resistance models during simulation. The SPICE model simulates the dynamic behavior of the SPAD device in the "photon reception-avalanche pulse generation-quenching-reset" operational process, as well as the static current-voltage (*I-V*) characteristics of SPAD from forward bias to secondary breakdown. The effectiveness and stability of this model were verified through simulations involving four quenching circuits.

Key words: SPAD; Spice model; simulation in Cadence; quenching circuit; gated mode

0　引言

单光子探测器作为基于光子飞行时间(Time of Flight，TOF)的三维成像技术的接收器，在汽车自动驾驶系统中有着广泛的应用[1]。目前，主流的单光子探测器主要有单光子雪崩二极管(Single

收稿日期：2023－09－27.

* 通信作者：程正喜

Photon Avalanche Diode，SPAD）和光电倍增管两种[2]。单光子雪崩二极管主要工作在雪崩光电二极管的盖革模式下，又称盖革模式雪崩光电二极管[3]。与光电倍增管相比，SPAD 增益高、功耗低、体积小、易于集成，更能满足当下低功耗、微型化、集成化的设计要求，具有更大的应用前景[4]。

通常一个基于 SPAD 的探测单元包括：SPAD 器件、淬灭电路和读出电路。三者在实际应用时都是相互匹配的，不同规格的 SPAD 器件需要分别设计相对应的淬灭电路和读出电路。建立一个准确的 SPAD 仿真模型可以辅助淬灭电路和读出电路的设计，通过调整 SPAD 仿真模型的参数得到的仿真数据可以用来优化 SPAD 器件的设计。

Zappa 等在 2009 年提出一种增强型的 SPAD 模型[5]。该模型通过多支路成功实现了对 SPAD 正向偏置区、击穿前的反向偏置区、盖革模式区以及二次雪崩击穿区的建模，能够模拟 SPAD 器件在更复杂情况下的工作状态。这个模型使用一个分段式的线性电阻模型来描述 SPAD 在盖革模式区的动态电阻，其分段点处阻值及其导数的不连续导致了该模型在盖革模式区仿真时出现不收敛的情况。东南大学的团队在 2013 年提出了用一个 e 指数函数模型代替分段电阻模型，以连续可微函数，避免了收敛问题[6]。

本文建立的 SPAD 模型采用 Zappa 团队的多支路结构完成对 SPAD 正向偏置区、击穿前的反向偏置区、盖革模式区以及二次雪崩击穿区的建模。在使用 e 指数模型优化盖革模式区分段电阻的过程中发现，单一 e 指数无法准确描述该阻值的变化。本文通过两个 e 指数（分别描述高、低阻区）的和的形式来描述 SPAD 在盖革模式区的动态电阻，拟合结果与 SPAD 的阻值曲线吻合较好，同时避免了收敛问题。

为了验证模型的准确性，本文将其应用到了 4 种不同淬灭电路的仿真当中，包括：被动淬灭电路、基于被动淬灭的门控电路、理想主动淬灭电路和实际主动淬灭电路，仿真结果表明本模型是一个有效的、稳定的 SPAD 模型。

1　SPAD 器件原理及模型的建立

1.1　SPAD 器件原理

SPAD 主要工作在反向偏置电压略大于雪崩击穿电压的盖革模式下，偏置电压在二极管的耗尽层中形成了一个强电场。此时有微弱的光信号在耗尽层中激发出微量的光生电子-空穴对（光电效应），这些光生载流子就能从耗尽层中的强电场中获取足够的能量去碰撞晶格，激发更多的载流子[7]。而新的载流子又能继续碰撞激发，这样的雪崩过程将会形成极大的电流增益，产生可观的雪崩电流。在没有光子注入 SPAD 器件的情况下，二极管耗尽层中没有载流子，不会产生雪崩电流。这种原理使得 SPAD 能将极其微弱的光信号转换为可观测的电信号，实现单光子的探测。

1.2　SPAD 模型的建立

本文采用了引言中提到的增强型 SPAD 模型结构，模型中的参数也取自文献[5]。如图 1 所示，该模型实现了雪崩电流的自持续和自淬灭，用 1，2，3 三条支路分别模拟了 SPAD 在盖革模式区、正向导通区和二次击穿区的器件特性。而 SPAD 其余区域电阻相对较大，在模型中用断路表示。该模型用 S_1 和 S_2 两个压控开关判断 SPAD 的电压偏置是否处于盖革模式。S_{TRIG} 为雪崩的触发开关，只在偏置电压处于盖革模式下时有效。当偏置电压处于盖革模式下时，S_1 和 S_2 断开，若此时有光信号（用电压源模拟）注入，接收雪崩信号的触发开关 S_{TRIG} 闭合，支路 1 导通，产生的电流在 R_{SENCE} 上产生压降，使得开关 S_{SELF} 以及其所在的支路导通。因此光信号停止后电流仍可以通过 S_{SELF} 继续流动，模拟自持续的雪崩电流。将 S_{SELF} 的断开阈值设置为 SPAD 自淬灭的电流阈值（大约 100 μA）后便可以实现雪崩电流自淬灭的功能。

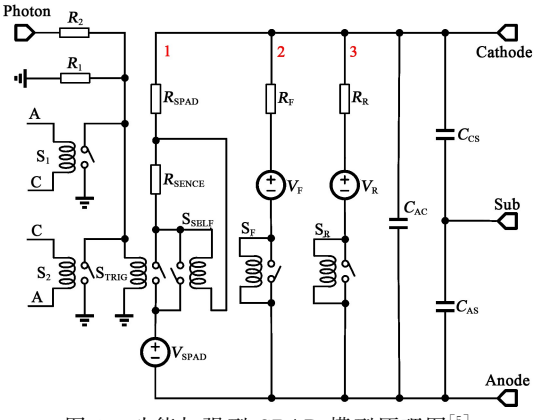


图 1　功能加强型 SPAD 模型原理图[5]

如果 SPAD 所加的偏置电压在盖革模式区之外，S_1 和 S_2 的其中一个闭合，S_{TRIG} 保持常开状态，以此屏蔽支路 1。若偏置电压是正向且绝对值大于 V_F，则 S_F 闭合，支路 2 导通，这时模型模拟 SPAD

的正向导通区，功能相当于正向导通的二极管。其中 R_F 为二极管的正向导通等效电阻，V_F 为截止电压。

支路 3 用于模拟 SPAD 的二次击穿状态，S_R 是控制该支路的开关。SPAD 的二次击穿不同于一般器件的二次击穿，其本质是二次的雪崩击穿，不会导致器件的直接损坏，应作为 SPAD 一种可能的实际状态进行考虑。其中 R_R 为二次击穿时 SPAD 的等效电阻，V_R 为二次击穿的阈值电压。

R_{SPAD} 即为 SPAD 在盖革模式区的等效电阻，其影响 SPAD 雪崩触发时脉冲电流的高度和淬灭过渡阶段的时间常数。对于原模型中分段等效电阻模型 R_{SPAD} 所导致的收敛问题和单 e 指数拟合偏差较大的问题，本文通过 Verilog-A 语言建立了一个双 e 指数之和的电阻模型 R_D：

$$R_D = a \cdot e^{-bV_{res}} + c \cdot e^{-dV_{res}} \quad (1)$$

其中，V_{res} 为电阻两端的电压。前一个 e 指数中的 a 为高阻系数，并具有大的衰减系数 b，使其能在接近零偏的高阻区起主要作用，在远离零偏的低阻区占次要部分。后一个 e 指数中的 c 为低阻系数，有较小的衰减系数 d，其在接近零偏的高阻区占次要部分，由于衰减系数小，其在远离零偏的低阻区占主要部分。

其拟合函数曲线和 Verilog-A 代码分别如图 2 和 3 所示，R_D 的拟合数据点由 Zappa 团队在 2009 年的文章中得到[5]，拟合得到的电阻曲线函数为：

$$R_D = 4\,437 \cdot e^{-4.764V_{res}} + 678.8 \cdot e^{-0.157\,3V_{res}} \quad (2)$$

该拟合结果的决定系数为 0.998，表明该函数模型能够很好地匹配所使用的数据点。

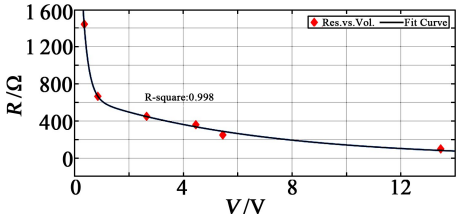


图 2 电阻 R_D 的拟合曲线

```
// VerilogA for SPAD, res, veriloga

`include "constants.vams"
`include "disciplines.vams"

module res(out, in);

inout in, out;
electrical in, out;
real R;

branch (in,out) res;

analog begin

R= 4437*exp(-4.764 *V(res))+678.8*exp(-0.1573*V(res));

I(res)<+V(res)/R;

end
endmodule
```

图 3 电阻 R_D 的 Verilog-A 代码

SPAD 模型的 I-V 特性曲线如图 4 所示，可以看出该模型已经较好地具备了设计时所希望实现的 SPAD 静态特征。图 4 中可能无法分辨二次击穿区和雪崩击穿区的界限，这是因为在拟合 R_D 的阻值函数时，本文将 R_R 的阻值作为雪崩击穿区的最后一个阻值进行了拟合。实际上图中二次击穿区是一次函数，而雪崩击穿区是 Verilog-A 中所描述的二次 e 指数函数。

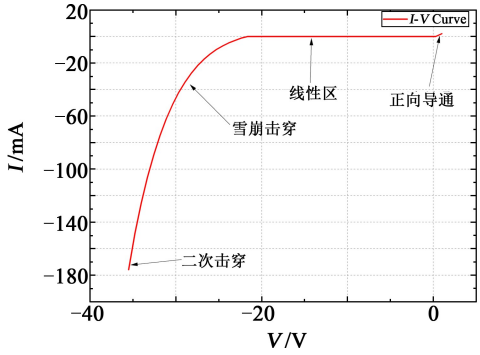


图 4 SPAD 模型的 I-V 特性曲线

2 被动淬灭电路和基于被动淬灭的门控式淬灭电路

2.1 被动淬灭电路(PQC)

为了验证所建 SPAD 的 Spice 模型的准确性，本文搭建了如图 5 所示的被动淬灭仿真电路。其中 V_A 为反向偏置电压，其值必须大于 SPAD 模型的雪崩击穿电压 V_B=21.54 V，本文选择了 V_A=28 V。仿真电路使用方波发生器 V_{PH} 模拟光信号的注入，设定的 V_1=0 V，V_2=1 V，上升和下降时间均为 10 ps，高电平的持续时间为 100 ps，延时 10 ns。R_L=220 kΩ，作为被动淬灭电阻其需要相对大的阻值；R_S=50 Ω，作为输出电阻。

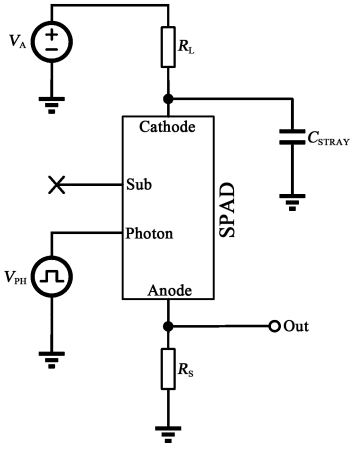


图 5 被动淬灭电路仿真原理图[5]

C_{STRAY} 是 SPAD 阴极的补充杂散电容，将 C_{STRAY} 设置为 10 pF 后用图 5 中的电路进行瞬态仿真，结果如图 6 所示。其中包含了模型的阴极电压 V_C 和输出电阻得到的雪崩电流 I_S，可以看到在 10 ns，V_{PH} 电压跳转的时候，V_C 快速下降，而 I_S 迅速上升，形成了一个雪崩脉冲。随后由于被动淬灭电阻 R_L 的存在，V_C 持续下降，而 I_S 在迅速达到峰值后也开始下降（被动淬灭）。直至 I_S 到达 100 μA 左右模型触发了自淬灭功能，I_S 骤降为 0，V_C 电压值也开始回升。至此已经成功实现了被动淬灭电路从雪崩触发、淬灭过渡、完全淬灭到复位的过程。仿真结果证明，该模型具备模拟触发雪崩、自持续雪崩电流以及自动淬灭的功能。

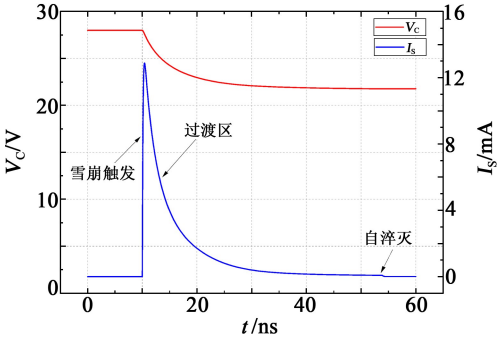


图 6　被动淬灭电路瞬态仿真结果

为了验证模型从线性区到盖革模式区再到二次击穿区的稳定性，本文使用一个方波发生器作为偏置电压源，使 V_A 在 800 μs 内从 20 V（低于 V_B＝21.54 V）线性上升至 37 V（高于 V_R＝35 V），并每隔 50 μs 输入一个模拟光信号进行仿真实验，仿真结果如图 7 所示。从图中可以看出该模型正确模拟了 SPAD 的三个特性：1）只有 SPAD 处于盖革模式区（V_B 和 V_R 之间）时才会触发雪崩效应；2）当处于雪崩击穿电压以下时，模型中没有雪崩电流产生，电压 V_C 跟随 V_A 线性上升；3）当处于二次击穿电压以上时，SPAD 不会触发雪崩效应，V_C 电压几乎保持恒定，而电流因为大电阻 R_L 的存在缓慢增加。

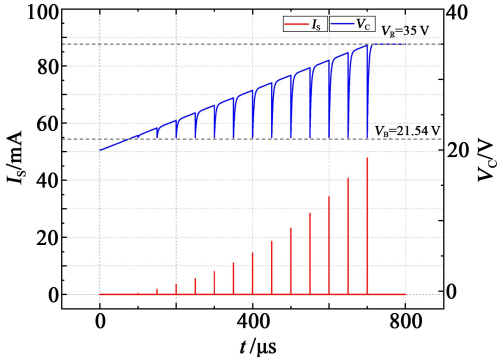


图 7　模型从线性区到盖革模式区再到二次击穿区的瞬态仿真结果图

图 8 为在不同偏置电压下输出雪崩脉冲电压仿真结果与测试结果对比图[5]。由于模型中引入了双 e 指数和等效电阻，仿真结果在雪崩峰值幅度和总体脉冲波形方面都较好地贴合了实际的测试结果。相较于原文的模型，本文的模型的雪崩峰值幅度更加接近测试结果。

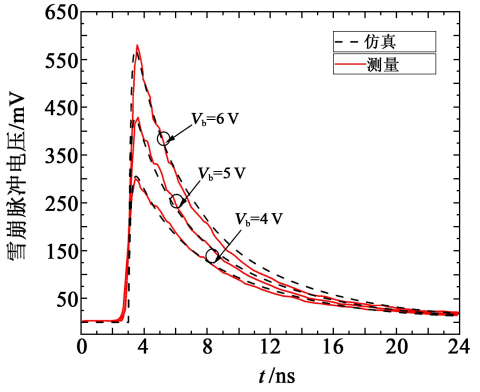


图 8　不同偏置电压下输出雪崩脉冲电压仿真结果与测试结果对比图

2.2　基于 PQC 的门控式淬灭电路

如图 9 所示是基于 PQC 的门控电路仿真原理图，其中 V_{PH} 是方波发生器充当门控电压源，模拟光信号，R_L＝220 kΩ 是被动淬灭电阻，V_A＝21 V 是预偏置电压，R_S＝50 Ω 是输出电阻，C_S 为输出耦合电容。当门控关闭时，门控电压 V_G＝0，SPAD 的偏置电压等于 V_A，不足以触发雪崩效应；当门控开启时，SPAD 的偏置电压等于 V_A+V_G，其值应大于 V_B 以满足触发雪崩的条件。

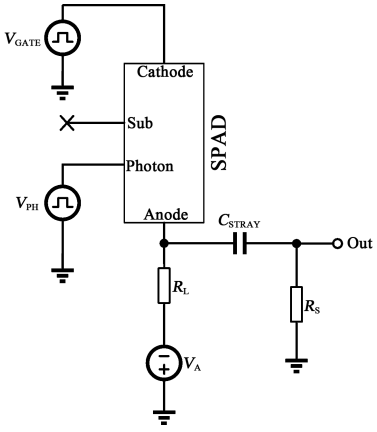


图 9　基于 PQC 的门控电路仿真原理图[5]

图 10 是设置门控高度为 7 V、输出耦合电容

C_S=20 pF 时门控电路的仿真结果。由于 SPAD 的结电容和输出耦合电容 C_S 的存在，输出信号 V_{out} 在门控电压开启时会产生一个正向脉冲，而关闭时则是一个负向的脉冲，二者的脉冲幅值的绝对值相等。在门控开启时，雪崩效应能被正常触发并进入被动淬灭的过渡阶段。如果在这个过程中门控信号关闭，SPAD 的偏置电压将小于 V_B，就如图 10 中所示雪崩效应会立刻被淬灭；若门控持续开启，则 SPAD 将继续正常的被动淬灭过程。为了能够准确地探测到门控模式下的雪崩触发，后续检测脉冲比较器的阈值必须要处于雪崩脉冲幅值和与之同向的门控脉冲幅值之间。这两个幅值的大小除 SPAD 本身的器件参数外主要受门控电压和输出耦合电容 C_S 影响。

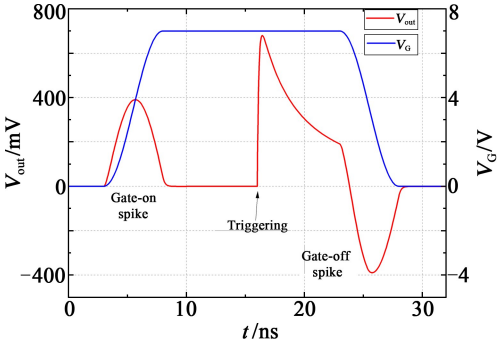


图 10 门控电路仿真结果

3 理想主动淬灭电路和实际主动淬灭电路

3.1 理想主动淬灭电路(AQC)

图 11 是本文使用的理想 AQC 仿真电路原理图。其中 V_A=28 V，提供偏置电压；SPAD 模型和 R_1 组成淬灭端子，电阻 R_1=50 Ω；C_C 和 R_2 组成感应端子，用来感应淬灭端子的状态变化。为实现感应端子的功能 C_C 的值应等于 SPAD 内部的等效电容 C_{SPAD}=4.33 pF，并且 R_2 的阻值应等于 R_1。Comp 为用 Verilog-A 描述的比较器，为防止电路的振荡设比较阈值为 0.5 V；DELAY 提供电路的延时；V_Q，S_R 和 S_Q 组成 AQC 的驱动器，V_Q=7 V 提供主动淬灭电压，S_R 是控制复位信号的开关，S_Q 是控制淬灭信号的开关。

图 12 是电路原理图中 a，b，c 三点在一个探测周期中电压的变化情况。其中 b 点雪崩触发沿在理想的情况下应是垂直上升的，由于本文所建立的模型中存在等效电容，所以雪崩的触发沿呈曲线形式上升。b，c 点处的主动淬灭和复位脉冲是 V_Q 接入和断开所导致的电位突变。仿真结果表明，本文建立的 SPAD 模型成功地模拟了 SPAD 在理想 AQC 电路中的动态特性。

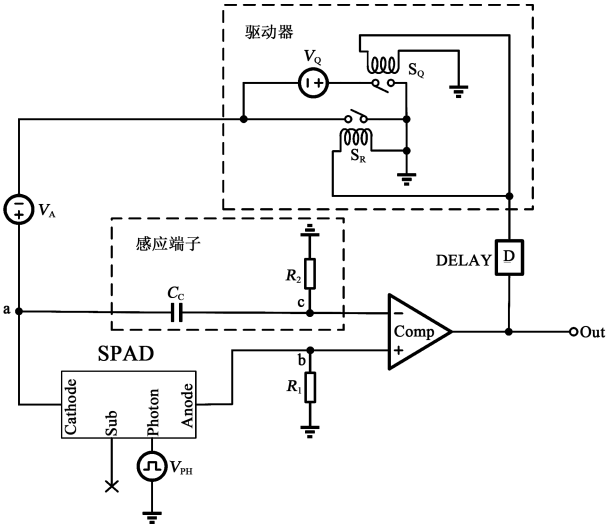


图 11 理想主动淬灭电路仿真原理图[7]

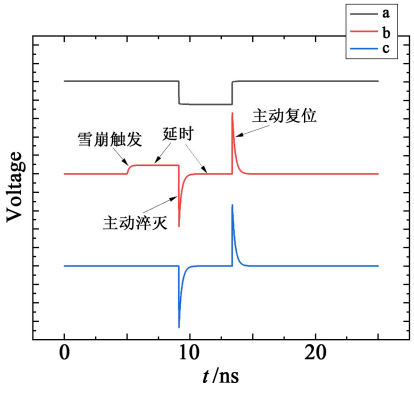


图 12 理想 AQC 电路仿真结果

3.2 实际主动淬灭电路

考虑到 SPAD 应用的实际环境，理想 AQC 电路的性质并不能充分验证该模型在实际主动淬灭电路中的性能特点。为此本文建立了如图 13 所示的 AQAR(Active Quenching and Active Reset)电路，即主动淬灭和主动复位电路。其中电源 V_A=25 V，提供 SPAD 的偏置电压；V_{CC}=5 V，提供整个电路的标准驱动电压和主动淬灭时的阳极偏置电压；两个虚线框中的电路均是将输入信号转换为标准信号的转换电路；R_3=220 kΩ 为被动淬灭电阻，R_4=50 Ω 为输出电阻；M_1 和 M_2 是淬灭信号驱动的 MOS 管，作为淬灭电压偏置的开关；M_3 和 M_4 是复位信号驱动的 MOS 管，M_3 用于屏蔽淬灭电压，M_4 用于复位 SPAD 阳极电压。

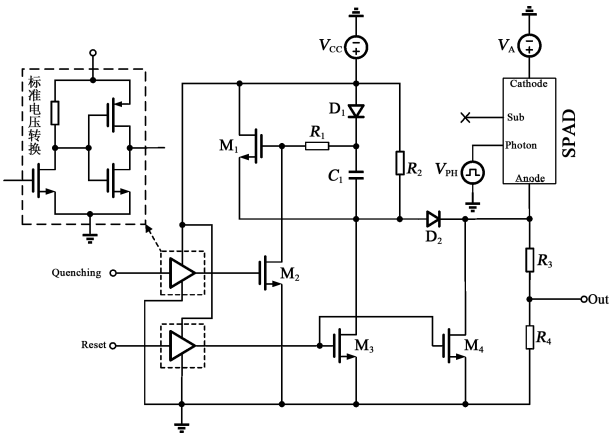


图 13　AQAR 电路仿真原理图[8]

图 14 是 AQAR 电路仿真的输出曲线。从图中可以看到，SPAD 成功触发了雪崩效应，并立刻进行被动淬灭；当 Quenching 信号输入后，被动淬灭转为速度更快的主动淬灭；再经过一段延迟时间后复位信号输入，输出信号迅速复位。在主动淬灭后的延迟时间内，输出曲线中出现了一个相对较小的下降沿，该下降沿对应 Quenching 信号的复位时间点。当 Quenching 信号由触发时的逻辑高电平回落到低电平时，M_2 管导通使得 M_1 栅极电压下降，M_1 关闭后 D_2 管的阳极电压等于 V_{CC} 减去 M_1 的分压。关闭的 M_1 管等效电阻相当大，M_1 的分压就近似等于 V_{CC}，D_2 管阳极的电压从之前的 V_{CC} 骤降为零。由于 D_2 管结电容的存在，这个下降沿就被反映在延迟时间的输出曲线中。从仿真结果看，该 Spice 模型成功模拟了 SPAD 在实际主动淬灭电路中从雪崩触发、被动淬灭、主动淬灭到主动复位的动态特性。

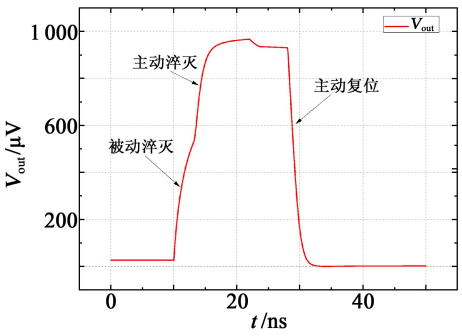


图 14　实际 AQC 电路的仿真结果

对于 SPAD 的探测电路来说，电路的功率是十分重要的参数。一方面，功率越大，电路对电源的要求就越高；另一方面，功率影响着电路的发热，更多的热量意味着热载流子触发雪崩的概率更高，温度越高暗计数率越高[9]。图 15 和图 16 是 V_{CC} 和 V_A 电源在一个周期内的瞬时功率曲线。可以看到 V_{CC} 电源的最大瞬时功率是 9.58 mW，最小的瞬时功率是 0.32 mW；V_A 电源的最大瞬时功率是 234.12 mW，最小瞬时功率是 −42.01 mW。在 Quenching 信号电平由高转低时，V_A 电源出现了负数功率的情况。此时 SPAD 阳极电压升高至 V_{CC}，SPAD 彻底淬灭，模型内部的电流循环断开，SPAD 等效为一个电容 C_{SPAD}。在 SPAD 的阳极电压升高后，C_{SPAD} 开始对 V_A 电源放电，导致了反冲电流和负数功率的出现。

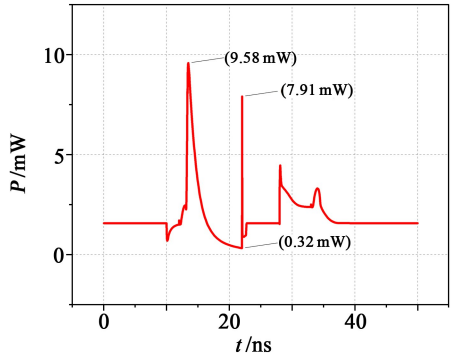


图 15　V_{CC} 电源在一个周期内的瞬时功率曲线

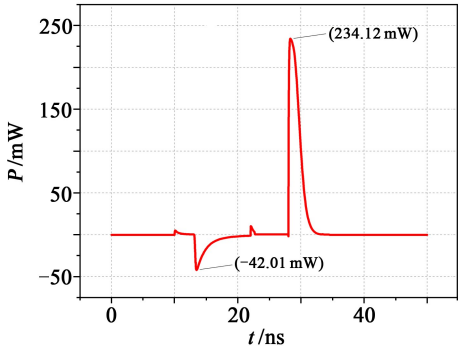


图 16　V_A 电源在一个周期内的瞬时功率曲线

对于 SPAD 探测器来说，电路的平均功率决定着电路的发热情况。为了得到该电路的最大平均功率，本文进一步调整了电路的参数，使该 AQAR 电路最快可以在 50 MHz 的频率下进行光子计数。该电路在 50 MHz 的频率下连续工作 1 μs 后测得的 V_{CC} 电源的最大平均功率为 3.3 mW，V_A 电源最大平均功率为 24.4 mW。

4　总结

本文使用两个 e 指数函数的和建立了连续的 SPAD 雪崩区的动态等效电阻模型，解决了以往分段电阻模型导致的仿真不收敛问题，比单 e 指数更吻合该 SPAD 的阻值曲线。本文以此为基础在

Cadence中建立了一个功能包含正向偏置区、击穿前的反向偏置区、盖革模式区以及二次雪崩击穿区的SPAD仿真模型。本文对四种不同淬灭电路进行了仿真，包括被动淬灭电路、基于被动淬灭的门控电路、理想主动淬灭电路和实际主动淬灭电路，并获得了良好的仿真结果，验证了模型的有效性。仿真结果表明，AQAR电路最高可实现50 MHz的光子计数频率。

参考文献：

[1] Rapp J, Tachella J, Altmann Y, et al. Advances in single-photon lidar for autonomous vehicles: Working principles, challenges, and recent advances[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 62-71.

[2] 刘俊良，李永富，张春芳，等. 基于APD-PIN结电容平衡电路的门控单光子探测器[J]. 红外与激光工程，2015，44(11)：3181-3185.
Liu Junliang, Li Yongfu, Zhang Chunfang, et al. Single-photon detector based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3181-3185.

[3] 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 and Infrared, 2017, 47(4): 389-398.

[4] Itzler M A, Jiang X, Entwistle M, et al. Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors[J]. J. of Modern Optics, 2011, 58(3/4): 174-200.

[5] Zappa F, Tosi A, Mora A D, et al. SPICE modeling of single photon avalanche diodes [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 153(2): 197-204.

[6] Huang D, Zhu R Xia, Liu S Yang, et al. SPICE modeling for single photon avalanche diode [J]. Proc. SPIE, 2013: 89080A.

[7] Cova S, Ghioni M, Lacaita A, et al. Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection[J]. Appl. Opt., 1996, 35(12): 1956.

[8] Fang Y Q, Luo K, Gao X G, et al. High detection efficiency silicon single-photon detector with a monolithic integrated circuit of active quenching and active reset [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(12): 918-925.

[9] Sciacca E, Giudice A C, Sanfilippo D, et al. Silicon planar technology for single-photon optical detectors [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2003, 50(4): 918-925.

作者简介：

匡 华(1999—)，男，浙江省湖州市人，硕士研究生，主要从事光电探测器及读出电路研究；

程正喜(1982—)，男，湖北省黄石市人，博士，副研究员，主要从事先进硅光电探测器方面的研究。