

单光子雪崩二极管猝熄电路的发展

王忆锋, 马钰

(昆明物理研究所 基础研究室, 云南 昆明 650223)

摘要 单光子雪崩二极管(SPAD)是工作在击穿电压上的雪崩光电二极管(APD)。对于极弱光学信号的探测,例如超音速飞行器早期预警的应用, SPAD可能是理想的探测器选择。SPAD必须与猝熄电路配套工作。基于pn结等效电路模型,分析了适用于SPAD雪崩猝熄的基本电路结构,例如被动、主动以及混合猝熄电路等。对于SPAD器件测试和筛选来说,被动猝熄电路简单适用,但其局限性也较大。主动猝熄电路可以充分利用SPAD的性能。混合方案则是设计简单紧凑电路或者满足特殊应用要求的有效方法。介绍了SPAD猝熄电路的工作原理、研究进展以及性能指标。

关键词 雪崩光电二极管; 单光子雪崩二极管; 猝熄电路; 超音速飞行器

中图分类号 TN312+.7 文献标识码 A 文章编号 1007-7820(2011)04-0113-06

Development of Quenching Circuits of Single Photon Avalanche Diodes

Wang Yifeng, Ma Yu

(Office of Fundamental Studies, Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract Single photon avalanche diode (SPAD) is an avalanche photodiode (APD) operating above its breakdown voltage, or what is called Geiger-mode. For the detection of very faint optical signals, for example, in application of early warning of hypersonic vehicles, SPAD may be an ideal choice. SPAD must operate in association with avalanche quenching circuits. Based on the equivalent circuit model of the pn junction, basic circuit configurations suitable for SPAD avalanche quenching, such as passive, active, and mixed quenching circuit, are analyzed. Passive quenching circuits, which are simple and useful for SPAD device testing and selection, have fairly limited application. Active quenching circuits make it possible to exploit the best performance of SPAD. Mixed solutions can be an effective approach to designing simple and compact circuits or for satisfying specific application requirements. General operating characteristics, recent progress, and the measures of performance of the SPAD quenching circuit are briefly reviewed in this paper.

Keywords avalanche photodiode; single photon avalanche diode; quenching circuit; hypersonic vehicle

在噪声远大于信号的情况下探测并分离出可用信息,需要用到终极的光子传感器——单光子探测器(Single Photon Detector, SPD)。SPD有望在超音速飞行器探测预警^[1]、国土安全与监视、量子成像以及加密系统等方面取得广泛应用,已经成为西方发达国家光电子学重点研究的方向之一。常见的SPD有光电倍增管、单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)、增强型光电二极管、微通道板、微球板和真空光电二极管、超导单光子探测器等等。基于Si、InGaAs、HgCdTe等半导体材料的SPAD探测器以其低功耗、可以构成大面阵、高分辨

率的组件等优点而备受关注。SPAD工作在盖革模式下,是目前较为成熟的技术。猝熄电路(Quenching Circuit)对于SPAD的性能有着重要影响^[2-3]。本文主要介绍了SPAD猝熄电路近年来的发展现状。

1 pn结开关特性与SPAD雪崩猝熄

pn结经常用于制作电子开关^[4]。一个通过转换pn结外加偏压实现的理想化开关电路如图1所示,其中正偏状态为开态,反偏状态为关态;图中还画出了pn结的高频等效电路。

根据pn结理论,在特定的反偏电压下,流过pn结的反偏电流会快速增大,这时的反偏电压称为击穿电压 V_b ,或称为雪崩阈值。雪崩增益 M 可以由下式描述

$$M = \frac{1}{1 - (V_A/V_b)^m} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-11-30

作者简介: 王忆锋(1963-),男,高级工程师。研究方向: 器件仿真研究。

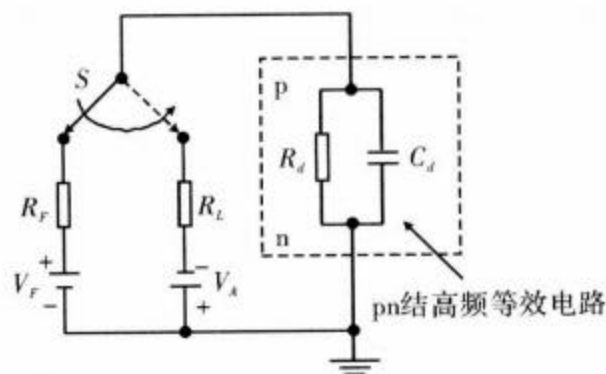


图1 将pn结由正偏变为反偏的理想化开关电路

式中, m 为与温度有关的特性指数。对于不同半导体材料, 禁带越窄, 放大越明显, 击穿电压也越低^[5]。文献中经常出现 SPAD、APD 这两个术语。通常 APD 是工作在小于击穿电压的反偏电压下; 而 SPAD 特指工作电压大于击穿电压的一类 APD^[6], 又称为盖革模式 SPAD。

在极微弱光照射下, 入射光子的能量经 SPAD 光电转换后生成的宏观可测量的电脉冲具有自然离散的特点; “离散”意味着它们可以被计数, 而计数可以通过开关动作来实现。具体到 pn 结, 如果要将图 1 所示的开关特性用于单光子探测, 则该电路要作些修改, 首先要去掉正偏部分, 因为只有利用 pn 结反偏下雪崩击穿形成的电脉冲才可能探测到单光子。一方面, 由于 pn 结中的电场强度较高 ($>3 \times 10^5 \text{ V/cm}^{[6]}$), 使得即使只有一个载流子注入到耗尽区也能诱发自维持 (Self-sustaining) 雪崩, 并且一直保持在这种状态, 电流在纳秒甚至亚纳秒内时上升到毫安培量级^[2-3]。因此需要在雪崩电流增大到损坏器件之前使雪崩结束, 这一机制称为猝熄。简而言之, 将 SPAD 的偏压降至击穿电压以下, 就可以实现猝熄; 为了使下一个光子到来时再次出现雪崩脉冲, 猝熄之后经过一个短时间, 必须把 SPAD 的偏压拉回到击穿电压之上即复位; 如此循环往复, 即可实现光子计数, 并进而算出光电流的大小^[7]。

实际上, SPAD 的正常工作除了要求器件具有实现猝熄/保持/复位等功能的机制外, 还要加上外部偏压源以及将 SPAD 的模拟输出信号转换为标准数字脉冲的鉴别电路, 所有这些构成了 SPAD 传感器的基础。有多种方法可以实现猝熄/保持/复位功能, 而这些方法均需要一个外部电路即猝熄电路^[3]。理想情况下, 猝熄电路应提供快速猝熄和复位, 以及足够长的保持时间。猝熄电路的分类如图 2 所示, 它主要有 3 种形式:

- (1) 直接串联一个大电阻以抑制雪崩电流的被动猝熄电路 (Passive Quenching Circuit, PQC);
- (2) 采用反馈电路调节偏压的主动猝熄电路

(Active Quenching Circuit, AQC);

(3) 混合方式, 包括被动/主动猝熄的混合; 模拟/数字电路的混合, 例如门控猝熄等。

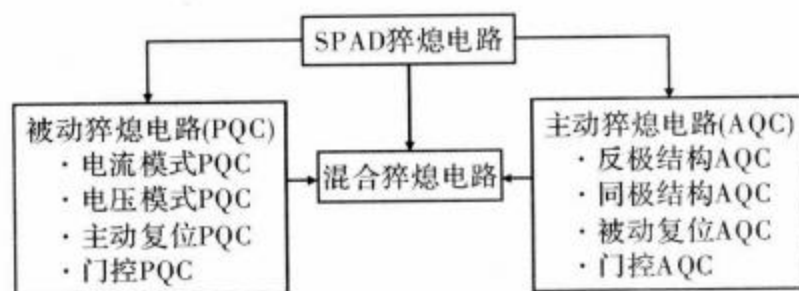
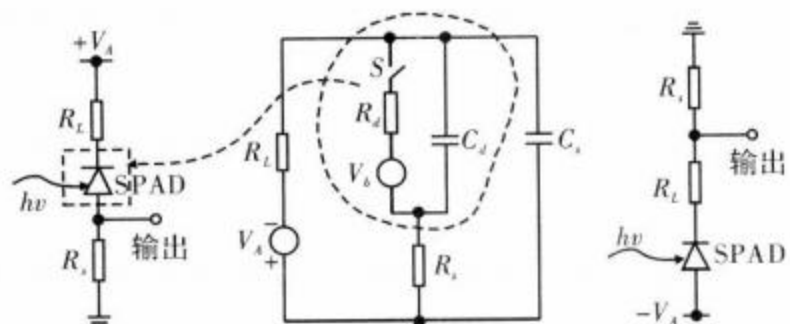


图2 SPAD 猝熄电路的分类

2 被动猝熄电路

如图 3 所示, 被动猝熄电路 (PQC) 是由一个大电阻 R_L 与 SPAD 简单串联构成, 单光子产生的雪崩电脉冲信号从一个采样电阻 R_s 上引出。根据 R_s 连接方式的不同, PQC 可以分为电流模式和电压模式, 如图 3 所示。在电流模式中, 采样电阻 R_s 接在 SPAD 的接地端, 输出脉冲波形直接就是 SPAD 中的电流波形; 电流模式在高速率计数及脉冲精确计时等方面具有最佳性能。在电压模式中, R_s 接在镇流电阻 R_L 的接地端, 其输出脉冲波形与 SPAD 的电压波形相仿, 只是幅值已被衰减; 电压模式结构简单, 缺点是 SPAD 的时间特性不能得到充分利用^[3]。



(a) 电流模式 PQC (b) 电流模式 PQC 的等效电路 (c) 电压模式 PQC

图3 被动猝熄电路

SPAD 的等效电路图如图 3(b) 所示, 它可以看作一个理想的光控开关 S 与一个电压源 V_b 的串联构成。 V_A 为偏置电压, 有光子入射时 S 闭合。另外, R_d 为 pn 结的等效电阻, C_d 为 pn 结的结电容^[7], C_s 为杂散寄生电容, 其值一般在 pF 量级。

单光子电脉冲信号的产生分为 3 个阶段:

(1) 等待阶段。

此时没有光子到达, 光控开关 S 断开, 在 C_s 及 SPAD 上加一负偏置电压 V_A 。实际加在 SPAD 上的工作电压 V_d 比击穿电压 V_b 高 ΔV , R_s 上的电压为零。

(2) 雪崩阶段。

此时有光子到达, 光控开关 S 合上, 电容 C_s 开

始通过电阻 R_L 放电形成雪崩电流, 产生一个电压脉冲信号; 同时, 由于雪崩电流在 R_L 上引起的压降, SPAD 上的电压往 V_b 降低, 雪崩电流相应减小。当电压趋近 V_b 时, 下降速率减慢。如果 R_L 的阻值大到使电流减小到约 20 mA, 雪崩载流子的数量将变小, 倍增链中断的概率将变高, 最终使雪崩猝熄, 等效电路中的光控开关 S 重新断开。

(3) 恢复阶段。

雪崩停止后, 电容 C_L 以 R_L 中的小电流充电, 并以指数增长的方式迅速趋向于偏置电压 V_A ; 充电时间由 $R_L C_L$ 给出, 一般在毫秒量级^[8], 这段时间称为死时间。在死时间内, SPAD 的响应降低, 光子计数率受到限制。文献[9]介绍了一种利用多路开关来降低死时间的方法。在恢复过程中, R_L 也会有一个充电信号, 但是比雪崩信号要小 2~3 个数量级。当恢复阶段结束后, 电路回到初始的等待阶段。如果在上述 PQC 结构中的适当位置引入快速电压开关, 即可构成具有主动复位功能的 PQC^[3]。

如果引入对脉冲通路上的脉冲起着开关作用的门电路, 可以衍生出门控模式的 PQC。门控模式适用于已知光子到达时间的场合, 例如卫星激光测距等^[10]。其基本想法是, 在没有光子到达的时间内, SPAD 所加偏压略低于击穿电压; 在光子预期到达的时间段内, 在反偏电压上再叠加一个脉冲电压, 使加在 SPAD 上的电压幅值大于击穿电压; 过了预期时间段后, 再撤掉脉冲电压, 恢复先前的反偏电压。于是 SPAD 只对门控脉冲以内到达的光子响应, 而对门控脉冲以外的信号没有响应。门控模式可将 SPAD 处在雪崩状态下的时间控制在几纳秒, 甚至在门控脉冲很窄时不需要猝熄电路, 相应地使 SPAD 工作于更安全的状态, 提高器件使用寿命。

门控 PQC 的门输入有直流耦合和交流耦合之分^[3], 如图 4 所示。在直流耦合 PQC 中, 门控脉冲直接和直流偏压源 V_A 串联, 如图 4(a) 所示。在交流耦合 PQC 中, 门控电压通过电容 C_g 耦合到 SPAD 上, 如图 4(b) 所示。当门脉冲注入时, SPAD 的结电容会产生充电和放电尖峰脉冲, 影响了雪崩信号的鉴别。文献[11]报道, 利用交流耦合方式提供门脉冲信号, 通过延迟补偿和采样门控可以消除尖峰脉冲的干扰。此外, 也可以利用结电容平衡魔 T 网络耦合的方法, 克服尖峰噪声的影响^[12]。门控 PQC 的深入分析必须考虑到门控脉冲的结束将终止雪崩电流, 如果在那一时刻电流仍然流过的话。因此, 不仅需要处理自猝熄被动门控电路, 还需要考虑由门控终止猝熄的被动门控电路。

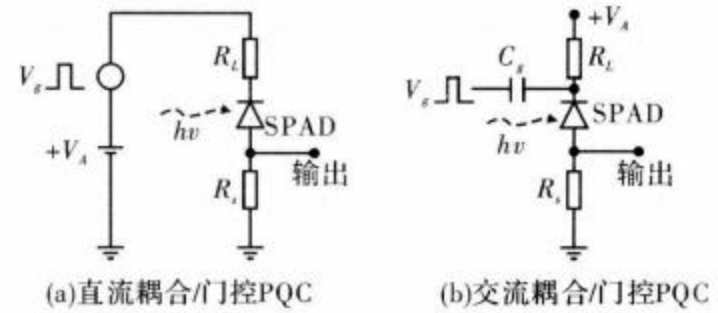


图 4 门控 PQC 有两种形式

3 主动猝熄电路

PQC 的优点是可以在几纳秒内的中止雪崩, 缺点是由于杂散电容的影响, 复位时间是在微秒量级^[3,13]。由于即使在极微弱光辐照环境下, 单位时间内到达 SPAD 的光子数量仍然可能很大, 为了尽可能缩短复位时间, 衍生了主动猝熄电路。AQC 的复位时间可以短至纳秒量级^[14]。

AQC 与 PQC 产生电脉冲信号的过程相同, 两者的区别在于, AQC 引入了主要由比较器、驱动器等构成的外围电路, 如图 5 所示; 其中, 比较器用于探测或感应雪崩脉冲的出现; 驱动器包括 SPAD 偏压调控、猝熄和复位等电路机制, 其特点之一是在低电平逻辑脉冲驱动下产生高电平脉冲, 可以通过脉冲升压电路、电子开关等方式实现^[3]。比较器一旦测出雪崩电流的上升沿即开始通过驱动器降低偏压, 经过一段固定的^[7]的保持时间, 再平稳地加上偏压。比较器和驱动器必须在几百 ps 的时间内准备就绪^[13]。

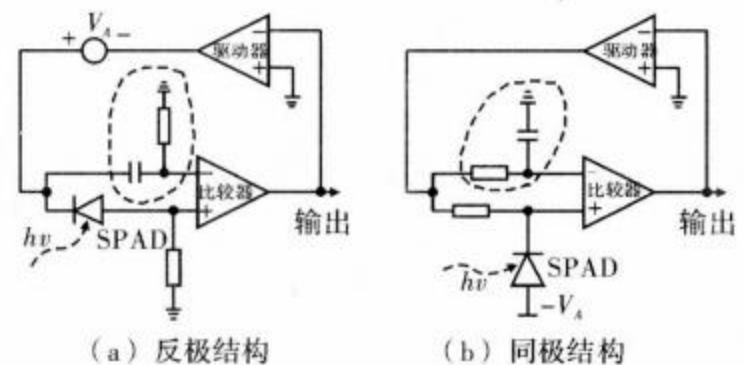


图 5 AQC 与 SPAD 有两种连接方式

由于驱动器中引入了偏压源, 故 AQC 又称为有源抑制方式, 而 PQC 则称为无源抑制方式。AQC 的概念首现于 1975 年, 但直到 1981 年才开始有关深入研究^[2], 随后有多种形式的 AQC 出现^[16]。从于感应雪崩电流和施加猝熄脉冲的角度来看, AQC 与 SPAD 之间有两种连接方式, 相应地衍生出了两种 AQC 的基本结构: 一种是反极结构; 另一种是同极结构, 如图 5 所示。

(1) 反极结构。

在反极结构中, 猝熄端与感应端极性相反, 猝熄

脉冲叠加到探测器直流偏置电压上, 如图 5(a) 所示。当比较器感应出的雪崩脉冲与猝熄脉冲之间存在较大差异时, 比较器可能被猝熄脉冲的反射再触发, 使得 AQC 开始振荡。图 5(a) 中虚线框内的电路用于补偿猝熄脉冲通过 SPAD 电容注入的脉冲电流, 以避免电路振荡。对于猝熄脉冲来说, 虽然也可以使用交流耦合, 但因为交流耦合的若干固有缺陷例如易于过热等^[3], 所以一般倾向于使用直流耦合。另一方面, 直流耦合也有其局限性, 例如随着偏置电压的增加, 直流耦合电路的设计难度加大。故实用中, 这种结构不适合击穿电压 > 30 V 的 SPAD 使用^[3]。

(2) 同极结构。

在同极结构中, 猝熄端与感应端极性相同, 如图 5(b) 所示; 其中虚线框内的电路有两个作用, 一是避免猝熄脉冲将电路锁闭在触发态; 二是避免由于猝熄脉冲较小的过冲和振铃导致电路振荡。同极结构的基本优点是适合任意击穿电压的 SPAD, 因为有一个器件端口是自由的, 未接入 AQC, 可用于任意施加所需要的直流偏压。

可以通过在 AQC 中引入被动复位或混合主动/被动复位来避免 SPAD 电压恢复过程中的过冲和振铃。在混合主动/被动复位中, 一个主动驱动器用来快速将电压带到接近休眠的水平, 然后关掉, 剩下的一小部分渡越过程留给较慢但是比较平稳的被动复位。图 6 是一个引入被动复位的 AQC 电路原理图, 其中一个快速 npn 型双极晶体管 Q_1 被比较器合上, 通过使电流流过负载电阻 R_L 来猝熄雪崩。经过一个大于猝熄渡越的时间延迟, 一个 pnp 型晶体管 Q_2 合上, 使比较器复位, 并进而使 Q_1 断开。此时, 快速开关二极管 D_1 和 D_2 均处在断开状态, SPAD 与电路的其他部分隔离。可以用一个低阻值 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 平稳地将电压拉至熄灭电平, 通过精确地将杂散电容和探测器电容最小化, 可使所需的恢复时间 < 20 ns。

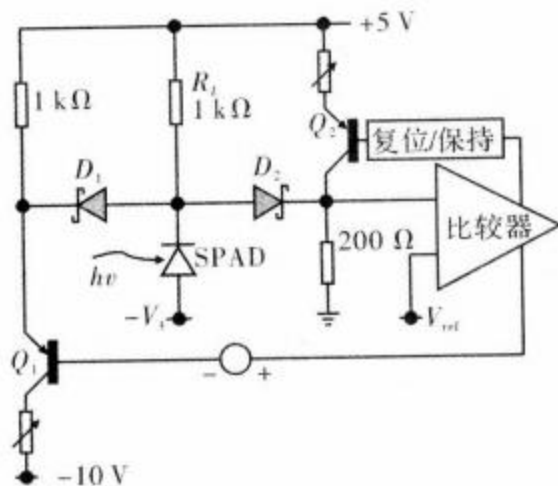


图 6 引入被动复位的 AQC 电路原理图

类似于 PQC, 也可以将门控电路引入 AQC。图 7 所示为一种门控 AQC 的原理图。当没有光子到来时, SPAD 处于休眠状态, 没有电流流过, 利用低阻抗驱动器, APD 阴极被 AQC 偏置接地。通过一个快速比较器, 感应雪崩电流的快速启动; 快速比较器触发单稳态触发器并驱动输出级。比较器同时还通过施加一个猝熄脉冲 ΔV 触发驱动级, 猝熄脉冲与雪崩触发同步并且具有非常低的抖动。为了猝熄雪崩, ΔV 必须足够高以使二极管工作电压降低到低于 V_B 的水平。然后探测器以一个良好控制的延迟时间 T_{HO} 关断, 延迟时间结束后驱动器平稳地将 SPAD 的偏置电压恢复到原来的工作水平, 以准备探测下一个光子。在复位渡越时间, 因为寄生耦合与反射可能再次触发比较器, 它可以用一个单稳态触发器在整个复位期间闭锁。

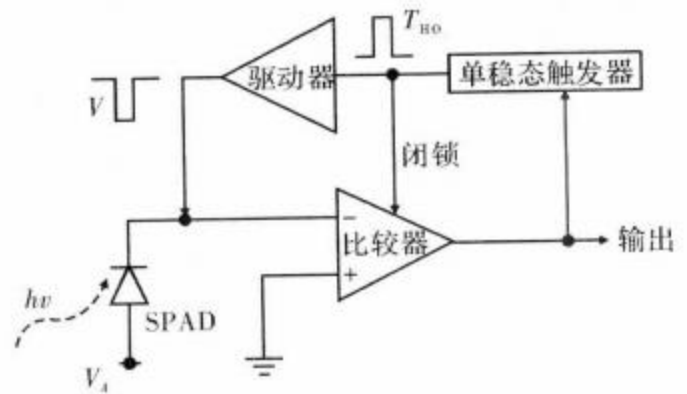


图 7 主动/门控猝熄电路原理图

由于当 SPAD 的反偏电压高于击穿电压时, 偏压的任何微小抖动都能改变 SPAD 结区场强的大小, 不但影响 SPAD 的雪崩增益, 还会引入散粒噪声、附加噪声等非光子脉冲噪声, 故 SPAD 的偏压源必须满足下列条件:

- 1) 电压要足够高, 能够达到 SPAD 的雪崩击穿电压以上;
- 2) 能够提供足够的电流, 满足 SPAD 雪崩时电流迅速增大的要求;
- 3) 要有足够小的纹波, 尽量减小由于电源电压抖动带来的噪声。这就意味着要求 SPAD 偏压源具有足够的电压稳定性。文献 [15] 介绍了一种低噪声、高稳定偏压电路的设计方法。

总之, AQC 方法提供的基本优点是从猝熄态到工作态以及反之的快速渡越, 雪崩电流持续时间短并且波形好, 死时间也短。虽然 AQC 的工作原理简单, 但要设计这样一个 AQC 并非易事, 其间会遇到很多问题, 为了充分发掘 SPAD 的性能, 必须设定严格要求^[16]。

4 混合猝熄电路

混合猝熄电路主要是指被动猝熄与主动猝熄的混合。由于自身加热、材料缺陷及光学串音等原因, 雪崩电流持续时间必须尽可能短。混合猝熄电路可以进一步降低雪崩电路持续时间^[13], 特别适合于发展紧凑型或单片式电路。图 8 所示为一个带有混合被动/主动猝熄电路的 SPAD 结构, 它包括 3 个部分: (1) 比较器, 用于感应雪崩的启动; (3) 逻辑模块, 用于产生 SPAD 猝熄和复位的命令; (3) 高电压驱动器, 用于产生施加到 SPAD 的实际电压信号。

单片式猝熄电路的第一步是将比较器和逻辑模块集成到一块称为 iAQC 芯片中, 如图 8 所示。因为 SPAD 可能将偏压设置在比击穿电压大几十伏特的范围, 而集成电路被限定在标准的 +5 V 电源, 故需要一些分立外部元件^[13]。该电路可与任意形式的 SPAD 配套, 可用于高击穿电压和大雪崩电流的场合。如图 8 所示, 在 SPAD 偏压网络中包括一个高阻值的镇流电阻 R_b , 该电阻用于提供一个瞬态被动猝熄动作, 然后再由一个主动猝熄动作快速跟进和确认。SPAD 所加偏压在 V_{high} 和 $-V_{low}$ 之间。对于适当的操作, $|V_{low}|$ 略大于击穿电压 V_b , 典型地取 $|V_{low}| \approx V_b - 1$, $|V_{high} - V_{low}| > V_b$ 且两者之差为击穿电压上所需的过偏压量。在这样的条件下, 只需要将 IN 结点的电平拉至地电位, iAQC 就可以猝熄雪崩。

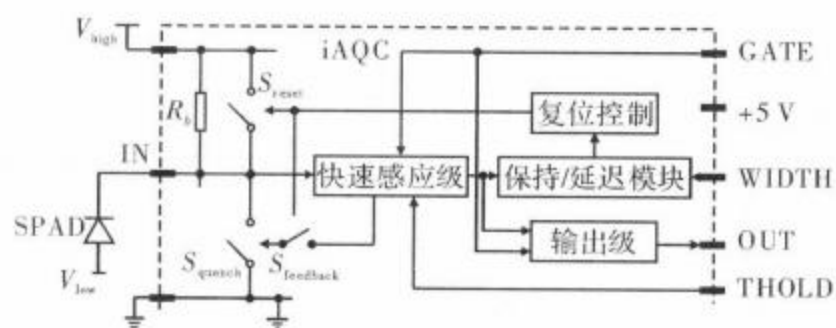


图 8 集成式主动猝熄电路(iAQC)框图

当雪崩电流触发时, 它在 R_b 上产生一个压降, 立即开始被动猝熄。一个灵敏度可以通过阈值管脚调节的快速感应级探测电流的启动, 并且通过开关 S_{quench} 将 IN 管脚的电平拉至地电位来确认 SPAD 的猝熄。感应级触发通过延迟模块传播, 延迟模块的作用是负责保持时间段的延续, 可以通过宽度控制管脚从外部进行调节。感应级还连接到输出级, 输出级产生一个标准的 TTL 输出信号, 该信号与主动猝熄开始的时刻同步, 可用于光子计数或测量光子到达的时间。当保持时间结束时, 延迟的脉冲到达复位控制级, 开关 $S_{feedback}$ 和 S_{quench} 断开, 开关 S_{reset} 合上。IN 节

点的电位 V_{IN} 朝着 V_{high} 方向增加, 复位控制网络将开关 S_{reset} 保持在合上状态直到 V_{IN} 几乎达到 V_{high} 。复位持续时间自动调节, 以在不需要任何外部调节的情况下完成任意 SPAD 在各种工作条件下的充分复位。然后 S_{reset} 断开, $S_{feedback}$ 合上, 芯片进入探测 SPAD 下一次启动的准备状态。每块 iAQC 芯片的大小均为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, 以此为基础, 可以构成阵列式的 SPAD 器件^[13]。

5 结束语

从概念上说, SPAD 也是一种开关器件, 包括猝熄电路在内的电子处理系统对于 SPAD 的性能有着重要影响。提高 SPAD 精度和时间分辨率的要求, 已使猝熄电路的研究重点从被动猝熄转向主动猝熄、从单一方式发展到混合方式, 例如被动 + 主动、被动 + 门控、主动 + 门控等。另外, 近年来的发展趋势是单片集成, 现有工艺已经可以将 SPAD 与猝熄电路集成为一体。猝熄电路的研制涉及设计、模型仿真^[7,17-18]、制备、调试与测试等多个环节, 实验性很强, 需要综合考虑应用背景、SPAD 器件结构、工艺可及性等因素, 权衡比较和选择具体的实现路径, 逐步完善, 以取得最佳匹配效果。另外, 现有猝熄电路的设计思路多为从电路结构的优化着手, 这一途径受到电子线路工作频率的限制, 文献[17]指出利用相关快物理过程进行雪崩抑制, 可以使电路变得简单, 探测效率提高。

参考文献

- [1] 王忆锋, 陈树勤. 高超音速飞行器红外探测预警分析[J]. 光电技术应用, 2010, 25(4): 21-22, 30.
- [2] Cova S, Ghioni M, Lotito A, et al. Evolution and Prospects for Single-photon Avalanche Diodes and Quenching Circuits [J]. Journal of Modern Optics, 2004, 51(9/10): 1267-1288.
- [3] Cova S, Ghioni M, Lacaíta A L, et al. Avalanche Photodiodes and Quenching Circuits for Single-photon Detection [J]. Applied Optics, 1996, 35(12): 1956-1976.
- [4] Donald A N. 半导体物理与器件[M]. 赵毅强, 姚素英, 解晓东, 等, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 孟庆巨, 刘海波, 孟庆辉. 半导体器件物理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] Zappa F, Tisa S, Tosi A, et al. Principles and Features of Single Photon Avalanche Diode Arrays [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 140(5): 103-112.
- [7] Tisa S, Zappa F, Tosi A, et al. Electronics for Single

- Photon Avalanche Diode Arrays [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 140(6): 113 - 122.
- [8] Spinelli A, Davis L M, Dautet H. Actively Quenched Single - photon Avalanche Diode for High Repetition Rate Time - gated Photon Counting [J]. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67(1): 55 - 61.
- [9] Polyakov S V, Schettini V, Degiovanni I P, et al. Improved Multiplexed Infrared Single Photon Detectors [C]. SPIE'2008, 2008.
- [10] Ghioni M, Cova S, Zappa F, et al. Compact Active - quenching Circuit for Fast Photon Counting with Avalanche Photodiodes [J]. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67 (8): 3440 - 3448.
- [11] 孙志斌, 马海强, 雷鸣, 等. 近红外单光子探测器[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5790 - 5795.
- [12] 吴光, 周春源, 陈修亮, 等. 长距离长期稳定的量子密钥分发系统[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3622 - 3626.
- [13] Franco Zappa, Massimo Ghioni, Sergio Cova, et al. An Integrated Active - Quenching Circuit for Single - Photon Avalanche Diodes [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6): 1167 - 1175.
- [14] Brian F Aull, Andrew H Loomis, Douglas J Young, et al. Geiger - Mode Avalanche Photodiodes for Three - Dimensional Imaging [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13 (2): 335 - 350.
- [15] 韩宇宏, 杨树, 马海强. 量子通信中单光子探测器的实验研究[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 322 - 326.
- [16] Tisa S, Zappa F, Tosi A, et al. Electronics for Single Photon Avalanche Diode Arrays [J]. Sensors and Actuators A, 2007, 140(11): 113 - 122.
- [17] 王金东, 吴祖恒, 张兵, 等. 用于红外单光子探测的雪崩光电二极管传输线抑制电路模型的理论分析[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5620 - 5626.
- [18] 袁俊, 吴广国, 张国青, 等. SPAD 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.

(上接第 112 页)

2.2 红外探测

此部分软件设计只需检测 $P_{1.5}$ 引脚是否为有高电平输入即可实现简单逻辑判断。硬件上红外探测模块本身有输出延时 T_d , 结合软件上的冗余验证, 确保判断正确无误。实际使用中还可以通过增加探测模块, 经二极管线与后实现多个信号源输入, 提高探测范围和准度。

2.3 掉电处理

基于 STC 内置的低电平检测功能, 结合中断应用, 当检测到 $P_{1.2}$ 脚电压低于设定值 4 V 时产生中断, 单片机将 T_{count} 值以及电量值 W 存入内部 EEPROM, 作为下次计数启动初始值。其程序流程与电量计量模块相同, 只是中断优先级略低, 故此处略去不再细述。

3 结束语

本智能电表的特点: 一是用简单、实用、成熟的软硬件设计实现了宿舍无人条件下的用电监控, 杜绝用电隐患, 实时提示功能简单实用; 二是与现有公寓用电管理终端相比, 本电表可脱离集中器与上位机独

立运行, 功能上不再依赖中继模块, 可单独安装, 不但大大降低了线路成本, 还降低了施工难度, 实测表明本电表可智能化监控用电安全。

参考文献

- [1] 宏晶科技公司. STC12C5202AD 系列单片机用户手册 [EB/OL]. (2009 - 01 - 10) [2010 - 01 - 12] <http://www.mcu-memory.com>.
- [2] Analog Devices. Inc. ADE7755 Single Phase Energy Metering IC with Synchronized Pulse Output [EB/OL]. (2003 - 09 - 18) [2011 - 01 - 05] <http://www.analog.com>.
- [3] 田亮, 何培祥, 李庆东, 等. 新型智能红外线防盗系统设计 [J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 580 - 581.
- [4] 吴小平. 实用红外探测防盗报警装置 [J]. 黔东南民族师专学报, 2000, 18(3): 29 - 31.
- [5] 于胜云, 孙胜利. 多路无线红外探测智能安防系统设计 [J]. 激光与红外, 2008, 38(4): 345 - 347.
- [6] 刘舒祺, 施国梁. 基于热释电红外传感器的报警系统 [J]. 国外电子元器件, 2005(3): 18 - 20.
- [7] 彭为, 黄科, 雷道仲. 单片机典型系统设计实例精讲 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.