

基于 APD-PIN 结电容平衡电路的门控单光子探测器

刘俊良^{1,2}, 李永富¹, 张春芳², 王祖强², 方家熊¹

(1. 山东大学 光学高等研究中心, 山东 济南 250100;
2. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

摘要: 以 APD-PIN 结电容平衡门控猝灭电路(GPQC)和 InGaAs/InP 雪崩光电二极管(APD)为核心研制了可工作在宽门控频率范围下的近红外单光子探测器。门控信号为 200 MHz 以下任意重复频率的尖脉冲, 门宽约 1 ns, 脉冲幅度约 10 V_{pp}。采用与 APD 结电容特性相近的 PIN 高频二极管研发了 APD-PIN 结电容平衡门控猝灭电路, 可有效地抑制门控微分噪声中的低频分量, 抑制比大于 40 dB。采用一组简单的 9 阶贝塞尔型电感-电容(LC)低通滤波电路滤除残余的高频噪声分量, 并使用通用的宽带射频放大器对雪崩信号进行放大。在 -52 °C, 0.1~200 MHz 门控频率条件下, 10%探测效率时暗计数率、后脉冲概率分别小于 6×10⁻⁶/gate、1.9%, 最高探测效率可达 26.4%。

关键词: 单光子探测; 低通滤波器; 雪崩光电二极管

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3181-05

Single-photon detector based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance

Liu Junliang^{1,2}, Li Yongfu¹, Zhang Chunfang², Wang Zuqiang², Fang Jiaxiong¹

(1. Advanced Research Center for Optics, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. School of Information Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: An NIR band single-photon detector (SPD), based on GPQC with balanced APD-PIN junction capacitance and InGaAs/InP avalanche photodiode, was designed which was able to work in wide gating frequency range. The SPD was driven by a pulsed gate signal of any frequency below 200 MHz, which had amplitude of 10 V_{pp} and pulse duration of approximately 1 ns. A novel GPQC was devised based on high-frequency PIN diode that had similar capacitive characteristics compared with APDs, such that the low-frequency portion of capacitive response of the APD was suppressed. Subsequently, a group of 9th ordered Bessel LC low-pass filters (LPF) were used to suppress the residual high-frequency portion. At the temperature of -52 °C and gating frequency ranged from 0.1-200 MHz, the dark count probability and afterpulse probability at detection efficiency of 10% were below 6×10⁻⁶/gate, 1.9%, respectively, and the highest detection efficiency reached 26.4%.

Key words: single photon detection; low-pass filter; avalanche photodiode

收稿日期: 2015-03-16; 修订日期: 2015-04-26

基金项目: 山东大学自主创新基金(2012GN04)

作者简介: 刘俊良(1990-), 男, 博士生, 主要从事光电系统方面的研究。Email: julysrain@yeah.net

导师简介: 李永富(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事半导体光电器件方面的研究。Email: yfli@sdu.edu.cn

0 引言

单光子探测器近年来已经成为微弱光信号探测领域的研究热点。在近红外波段,与其他探测器如光电倍增管、超导纳米线^[1]等相比,InGaAs/InP 雪崩光电二极管(APD)在通信波段、体积、工作温度等方面有实用性上的优势,已成为量子密钥分发、激光雷达^[2]、生物荧光探测等技术的重要组成部分。一个完整的单光子探测器通常包含光电探测器件(如APD)、器件驱动电路和雪崩信号提取电路。由于单光子探测器中的APD工作在反偏电压高于其击穿电压的模式(即盖革模式)^[3]下,其产生的雪崩电流会持续增大直至损坏器件,故雪崩需要及时猝灭以保护器件本身,并使器件复位以进行下一次探测。常见的猝灭形式包括被动猝灭,主动猝灭和门控猝灭,而门控猝灭是目前普遍采用的方法。“门”开时探测器可以产生雪崩,“门”关时雪崩猝灭。工作在门控猝灭模式下的探测器可以有很高的工作速度,同时也会降低暗计数和后脉冲概率;然而,门控信号会通过APD的结电容耦合至输出端,成为微分噪声,且幅度通常大于所产生的雪崩信号。因此,自门控单光子探测器出现以来,如何有效地从噪声中提取出微弱的雪崩信号就成为了人们探究的重点。

雪崩信号的提取通常分为两部分,一是门控微分噪声的滤除,二是雪崩信号的放大。目前滤除微分噪声的常见方法包括带阻滤波^[4]、低通滤波^[5-6]、正弦门控相消法^[7]、同轴电缆反射相消法^[8]、电容平衡法^[9]、双APD平衡法^[10]等多种方法。然而,这些方法均存在一些不足:带阻滤波和低通滤波可以很好地滤除微分噪声,达到很好的抑制效果,但滚降快、抑制比高的滤波器对雪崩信号波形的破坏很大,拖尾现象严重,且该方法在门控频率低时几乎不可用。正弦门控相消法通常用于高频门控,由于其通常需要移相器和衰减器精确调整来实现,所以只能针对单一门控频率。同轴电缆反射相消法采用了一定长度的空接和短接同轴电缆来实现噪声的自我抵消,鉴别提取电路变得复杂,且反射所需的时间限制了门控频率的进一步提高。电容平衡法由于采用的是介电材料电容,与APD结电容在特性上存在差异,其噪声抑制性能有限。双APD平衡法是目前较好的方法,

然而该方法需要使用两只特性近似的APD,但只有一个APD能工作在最佳状态,成本高昂。此外,一部分噪声消除的方法采用了差分放大器,但通常差分放大器的噪声系数比单端射频放大器高,最终会导致信噪比的严重下降。综上所述,虽然目前已有许多高频的单频门控噪声消除技术问世,但在可变门控频率下的门控噪声消除技术则或多或少存在性能和性价比等方面的问题。

文中借鉴了电容平衡法^[9]、双APD平衡法^[10]和低通滤波法^[5-6],利用与APD结电容特性相近的高频PIN二极管代替平衡电容或第二支价格昂贵的APD,设计了一种新的用于可变门控频率的门控猝灭电路(GPQC),并结合对波形破坏较小的贝塞尔低通滤波器和宽带射频低噪声放大器,研制了可变门控频率的单光子探测器,以较低的成本和复杂度实现了较高的信噪比。对该可变门控频率的单光子探测器,在多个频率点下进行了性能测试,包括暗计数率,探测效率和后脉冲概率。实验表明:采用APD-PIN结电容平衡电路的门控单光子探测器在-52℃,0.1~200 MHz门控频率条件下,10%探测效率时暗计数率、后脉冲概率分别小于 $6 \times 10^{-6}/\text{gate}$ 、1.9%,最高探测效率可达26.4%。

1 实验

门控单光子探测器测试系统结构如图1所示,图中实线框为系统组成模块,位于研制的探测器机箱内;虚线框为测试用设备或组件,位于探测器机箱外。核心器件雪崩光电二极管(APD)选用Princeton Lightwave公司带尾纤的PGA-300型InGaAs/InP APD,其结电容约0.25 pF($M=10, 1 \text{ MHz}$)。APD焊接在GPQC电路上,置于封闭腔中,通过铜质热沉固定在四级热电制冷片TEC4-24606上。制冷片最大温差107℃,最大制冷功率13.5 W,实际制冷温度受可调三端稳压器LD1084V控制,控制原理如下:热沉温度由Pt1000铂电阻测量,铂电阻输出的信号经放大和模数转换后送入FPGA,由FPGA中实现的PID算法计算电压控制量,并将该控制量经数模转换和放大,变为LD1084V的控制电压,控制其输出电压以调节制冷功率。APD工作时所需的直流偏置电压由受FPGA控制的稳压器TL783产生,可调范围44~

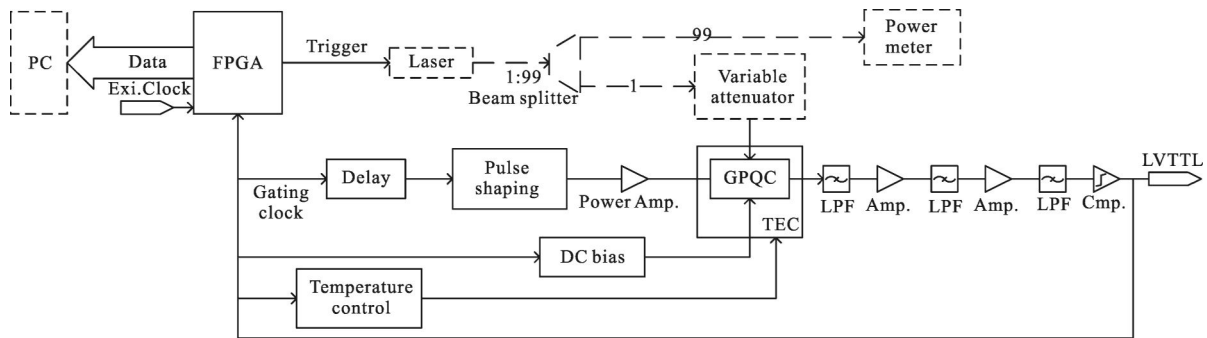


图 1 门控单光子探测器系统结构图

Fig.1 System configuration diagram of gated single photon detector

72 V, 步进精度 10 mV, 通过一限流电阻施加到 APD 阴极。门控信号通过电容耦合至 APD 阴极, 其产生原理如下: 外部参考时钟接入 FPGA, 由 FPGA 产生可变分频比的时钟信号, 经具有 5 ps 精度、10 ns 可调范围的延时器芯片 SY89297U 延时, 由带复位的 D 触发器芯片 MC100EP51 构成的单稳态电路整形为尖脉冲信号, 脉宽约 500 ps, 该信号经过带宽 1 GHz、增益 27 dB、功率 1 W 的中功率宽带放大器 ZFL-1000VH 放大后成为门控信号, 脉宽约 700 ps, 幅度达 10 V_{pp}。为测试该探测器的性能, 搭建了测试用单光子源, 即由 FPGA 产生同步触发信号触发 PDL 800-B 型 1 550 nm 脉冲激光器产生半高宽小于 30 ps 的激光脉冲, 通过 1:99 光纤分路器分为两路: 99% 支路连接至光功率计 PM-1613 以监控激光器的输出功率; 1% 支路连接至可调衰减器 FVA-3150, 将光脉冲能量衰减至平均每脉冲包含 0.1 个光子的水平, 通过光纤法兰耦合至 APD 的尾纤。

APD 吸收单光子后输出含门控微分噪声的微弱雪崩信号, 在通过 APD-PIN 结电容平衡电路后, 门控微分噪声的低频分量会被消除。APD-PIN 结电容平衡法抑制微分噪声的原理如下: 将两个直流偏置电压分别施加在 APD 和 PIN 二极管的阴极, 同时将同一个门控信号分别施加在 APD 和 PIN 二极管的阴极。当 APD 的工作偏置电压确定以后, 其结电容即为一定值, 调节 PIN 二极管的偏置电压, 使其结电容与 APD 的结电容相等, 此时 APD 输出的微分噪声和 PIN 二极管输出的微分噪声具有相同的幅度和形状。将这两个输出接入射频变压器的初级绕组, 微分噪声为共模信号, APD 产生的雪崩信号为差模信号; 此时将次级绕组的一端接地, 共模信号

被抑制, 差模信号即雪崩信号得到保留。该电路原理图如图 2 所示。

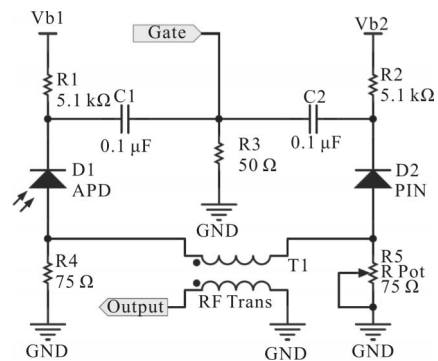


图 2 APD-PIN 结电容平衡 GPQC 电路原理图

Fig.2 Schematic of APD-PIN junction-capacitor balanced GPQC

实验发现由于射频变压器相位特性以及 PIN 结电容特性不理想, 上述平衡电路仅对低频或特定的高频频段抑制比较高, 需要进一步滤除残余的噪声。贝塞尔型无源 LC 低通滤波器是很好的选择, 其具有和巴特沃斯型一样简单的电路形式, 虽然阻带滚降率较差, 但群时延最平坦, 能最大限度地保持雪崩信号的波形。该系统中, GPQC 输出的雪崩信号通过了 3 只 9 阶贝塞尔型无源 LC 低通滤波器, 每只滤波器的 -3 dB 带宽为 80 MHz, 阻带 200 MHz, 阻带抑制比大于 20 dB, 其电路如图 3 所示。

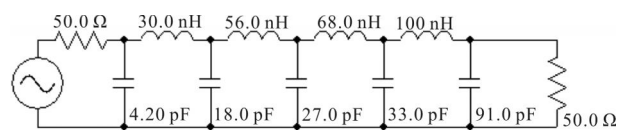


图 3 无源 LC 贝塞尔型低通滤波器原理图

Fig.3 Schematic of passive Bessel LC low-pass filter

每两只低通滤波器间插入了一级宽带射频放大

器 SGA4563Z, 其对 850 MHz 以内的信号增益在 25 dB 以上, 而噪声系数仅 2.4 dB, 有效地提高了雪崩信号的幅度。放大和滤波后的雪崩信号经高速比较器 MAX9601 鉴别, 由电平转换芯片 MC100EPT21 转换为 LVTTTL 电平的数字脉冲信号输出。该信号由 FPGA 采集和统计, 传送给上位机进行数据计算。

2 实验结果

图 4 是使用 DSO-X 91604A 示波器采集的一个放大滤波后的典型雪崩脉冲波形, 其中实线框中的部分为抵消后仍残余的门控脉冲微分噪声信号, 噪声信号幅度小于 50 mV_{pp} 。在制冷温度 $-52 \text{ }^\circ\text{C}$ 、直流偏压 61.00 V 时, 最后一级放大器输出的雪崩脉冲的平均幅度约 160 mV_{pp} , 半高宽约 7.5 ns 。可以看出: 经过噪声消除和放大后, 雪崩信号的幅度远大于噪声信号的幅度, 很容易被鉴别。

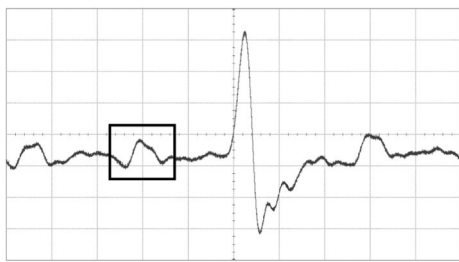


图 4 雪崩脉冲和残余噪声波形

Fig. 4 Waveform of avalanche pulse with residual noise

通过 FPGA 内设计的计数器进行雪崩脉冲数统计, 即可利用公式计算暗计数率 P_d , 探测效率 η 和后脉冲概率 P_a 这 3 个关键指标。暗计数率 P_d 为每门平均暗计数, 其计算公式为:

$$P_d = \frac{C_d}{f_g} \quad (1)$$

式中: C_d 为无入射光子条件下每秒的平均雪崩计数, f_g 为门控频率。探测效率 η 为一个光子到来后产生一个可测量的雪崩脉冲的概率, 其计算公式^[10]为:

$$\eta = \frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{1 - P_d}{1 - P_l} \right) \quad (2)$$

式中: μ 为每脉冲平均光子数, 即 0.1 ; $P_l = C_l / f_L$, C_l 为每秒平均有光门雪崩计数总和, f_L 为激光脉冲重复频率, 设定 $f_L = f_g / 256$ 以便于测量后脉冲概率。后脉冲概率 P_a 为一个有效计数发生后, 由后脉冲效应导致后续出现雪崩计数的概率, 其计算公式^[10]为:

$$P_{ap} = \frac{P_M - P_d}{P_l - P_M} \times \frac{f_g}{f_L} \quad (3)$$

式中: $P_M = C_M / (f_g - f_L)$, C_M 为每秒平均无光门雪崩计数总和。上述公式中待测的 C_d 、 C_l 和 C_M 均由 FPGA 内的门控计数器统计获得, 并传输至计算机计算结果。

测试了 200、100、20、10、5、1、0.1 MHz 工作频率下, 探测效率 10% 时探测器的具体性能, 如表 1 所示。通过调整直流偏置电压, 在所有上述测试的频率点下, 其探测效率最大值均已超过 25%。门控频率在 100 MHz 以上时, 达到探测效率 10% 所需的直流偏压较低, 其原因是所采用的门控信号功率放大器对于 100 MHz 以上的重复频率输出的脉冲幅度稍大, 使得所需的直流偏压值相应降低。

表 1 不同工作频率下探测器性能指标

Tab.1 Performance specifications of SPD working at various frequencies

Gating frequency	DC bias	Dark count rate/gate	Afterpulse probability
200 MHz	60.31 V	5.73E-06	1.872%
100 MHz	60.48 V	3.98E-06	1.002%
20 MHz	60.68 V	4.79E-06	0.860%
10 MHz	60.63 V	5.54E-06	0.587%
5 MHz	60.66 V	4.58E-06	0.605%
1 MHz	60.67 V	5.59E-06	0.326%
0.1 MHz	60.70 V	5.03E-06	0.043%

工作频率 200 MHz 下探测器的探测效率、暗计数率与后脉冲概率与所加直流偏置电压的关系如图 5 所示, 所加直流偏压从 59.11 V 变化至 61.46 V 时, 暗计数率从 $5.88 \times 10^{-7} / \text{gate}$ 增加至 $2.02 \times 10^{-5} / \text{gate}$,

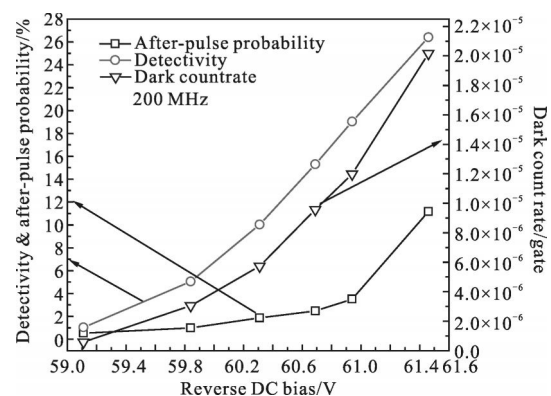


图 5 探测器各性能指标随直流偏压的变化

Fig. 5 Performance of detector vs DC bias

探测效率从 1.03% 增加至 26.4%, 后脉冲概率从 0.519% 增加至 11.2%。

3 结 论

采用 APD-PIN 结电容平衡电路和 9 阶贝塞尔型低通滤波器设计了可工作在一定频率范围内的门控单光子探测器。实验数据和波形表明:该电路组合对 200 MHz 以下重复频率的脉冲门控通过 APD 所产生的门控微分噪声的抑制效果良好。然而,由于所采用的低通滤波器通带较窄,虽然较好地保持了波形,抑制了高频噪声,但输出的雪崩脉冲一定程度上被展宽,幅度也被缩小。通过对 PIN 二极管的甄选和对平衡电路、滤波电路的调整,有望在更广的频率范围内实现较理想的噪声消除。

参考文献:

- [1] Marsili F, Verma V B, Stern J A, et al. Detecting single infrared photons with 93% system efficiency [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 210-214.
- [2] Yang Chunhu, Sun Dongsong, Li Hongjing. Photon counting applied to imaging lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 517-520. (in Chinese)
杨春沪, 孙东松, 李洪敬. 光子累计方法在成像激光雷达中的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(5): 517-520.
- [3] Wang Dinan, Chen Changqing, Wang Tingfeng. A study on photon counting detection principle of Geiger-mode avalanche photodiode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 83-88. (in Chinese)
王弟男, 陈长青, 王挺峰. 盖革模式雪崩光电二极管光子计数探测原理研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 83-88.
- [4] Namekata N, Sasamori S, Inoue S. 800 MHz Single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10043-10049.
- [5] Nino Walenta, Tommaso Lughni, Olivier Guinnard, et al. Sine gating detector with simple filtering for low-noise infra-red single photon detection at room temperature [J]. *J Applied Physics*, 2012, 112: 063106.
- [6] Li Yongfu, Liu Junliang, Wang Qingpu, et al. High speed single photon detector based on simple LC filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(B12): 7-11. (in Chinese)
李永富, 刘俊良, 王青圃, 等. 基于电感-电容滤波电路的高速单光子探测器[J]. *光学学报*, 2013, 33(B12): 7-11.
- [7] Liang Yan, Wu E, Chen Xiuliang, et al. Low-timing-jitter single-photon detection using 1-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(13): 887-889.
- [8] Bethune Donald S, Risk William P, Pabst Gary W. A high-performance integrated single-photon detector for telecom wavelengths[J]. *Journal of Modern Optics*, 2004, 51(9-10): 1359-1368.
- [9] Liang Yan, Jian Yi, Chen Xiuliang, et al. Room-temperature single-photon detector based on InGaAs/InP avalanche photodiode with multichannel counting ability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 115-117.
- [10] Joe C Campbell, Sun Wenlu, Lu Zhiwen, et al. Common-mode cancellation in sinusoidal gating with balanced InGaAs/InP single photon avalanche diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(12): 1505-1511.