

近红外单光子读取电路

黄 振^{1,2}, 蒋远大², 孙志斌², 郑 福^{1,2}, 王 超², 翟光杰²,

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘 要: 近红外单光子读取电路读取盖革模式下的雪崩光电二极管雪崩信号。采用两个 ps 级的可编程 ECL 延时芯片, 获得可调的门控脉冲, 控制雪崩光电二极管(APD)死时间和淬灭雪崩信号, 同时减少后脉冲的影响。详细介绍了门控脉冲产生模块、死时间控制模块以及雪崩信号提取电路。主要采用延迟鉴别、边沿锁存的方法提取雪崩光电二极管雪崩信号。在整个实验过程中, 雪崩光电二极管工作温度为 -55°C , 脉冲宽度 10 ns, 门控频率 1 MHz 和 10 MHz, 激光器激光波长 1550 nm, 单光子探测器是 PGA-400 InGaAs 雪崩光电二极管。

关键词: 近红外; 读取电路; 镓砷雪崩光电二极管; 盖革模式

中图分类号: O439; TP11; TP13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0464-05

Near infrared readout circuit of single photon diode

Huang Zhen^{1,2}, Jiang Yuanda², Sun Zhibin², Zheng Fu^{1,2}, Wang Chao², Zhai Guangjie²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The near infrared readout circuit reads avalanche signals of avalanche-photon-diode operating in the Geiger-mode. Two ps-grade programmable ECL delay chips were used to get adjustable gate pulse, control APD's dead time, quench the avalanche signals and decrease the after-pulsing. The paper detailed describes gate pulse generated block, dead time controlment block and avalanche signals readout block. A moderate delay and edge trigger flip-flop were used to read avalanche-photon-diode signals. During the whole experiments, avalanche-photon-diode worked in the temperature -55°C , the gate pulse width is 10 ns, the gate frequency are 1 MHz and 10 MHz, the wavelength of laser is 1550 nm and the single photon detector is PGA-400 InGaAs avalanche-photon-diode.

Key words: near infrared; readout circuit; InGaAs-APD; Geiger-mode

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61274024); 国家自然科学基金青年科学基金(40804032)

作者简介: 黄振(1987-), 男, 硕士生, 主要从事光电探测方面以及空间智能仪器与控制方面的研究。Email: huangzhen201209@yeah.net

导师简介: 孙志斌(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光子成像与通信、空间科学仪器、行星物理学方面的研究。

Email: zbsun@nssc.ac.cn

0 引言

单光子探测是一种极弱光探测技术,其灵敏度可以达到光子级别,其核心是单光子探测器件,广泛应用于高分辨率光谱测量、高速现象检测、精密分析、非破坏性物质分析、天文观测、光时域反射(OYDR)、大气污染、高能物理、生物发光、放射探测、国防军事、量子密钥分发系统(QKD)等领域^[1-6]。目前,世界各国正处于量子密码通讯研究的高潮,而作为量子密码通讯技术的关键技术之一的单光子探测技术,也逐渐在微弱光探测领域中凸显出其广阔的发展前景。随着半导体技术的不断发展,进一步推动了单光子探测技术的发展。

目前,广泛应用于单光子探测的光电探测器主要有光电倍增管(PMT)和雪崩光电二极管(APD)^[1-4]。光电倍增管由于其对可见光和紫外光有较高的增益而得到广泛应用和研究,当在近红外波段,光电倍增管的量子效率较低,因此,光电倍增管不适合应用于红外单光子探测。而雪崩光电二极管在红外波段具有量子效率高、功耗低、体积小、工作频谱范围大等优点,故雪崩光电二极管在单光子探测技术领域得到了广泛应用。根据不同的红外波段,有以下几种雪崩光电二极管:400~1100 nm 波长的硅雪崩光电二极管(Si-APD);800~1550 nm 波长的锗雪崩光电二极管(Ge-APD);900~1700 nm 波长的镓砷雪崩光电二极管(InGaAs-APD)。其中 InGaAs-APD 在 1310 nm 和 1550 nm 两个波段上的探测效率较高,无需液氮制冷,半导体制冷即可保证工作,是目前单光子探测领域中典型的探测器件,广泛应用于光通信和量子通信技术。

1 镓砷雪崩光电二极管

1979年Nishida等人提出了异质结结构^[7]。该结构有两个区域:一个是由窄禁带材料构成的吸收光子区域,另一个是分离的由宽禁带材料构成的提供载流子倍增的区域。一般将这种分离区域的APD结构称为分离吸收区和倍增区 APD(Separate Avalanche Multiplication, SAM-APD)。单光子信号在较低能带($E_g=0.73$ eV)掺杂的 InGaAs 耗尽层内吸收,在 InP 层的高电场作用下载流子获得倍增,该层

的 $E_g=1.35$ eV 是产生雪崩的适宜条件。

吸收层、保护层和倍增层分离的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的结构如图 1 所示。在吸收层产生的低电场削弱吸收层的隧道效应,降低暗电流和暗计数;在倍增层产生的高电场达到极高的光电增益,提高探测效率。在吸收层和倍增层之间的 InGaAsP 渐变层用于消除由于异性结突变产生的价电子带不连续导致的空穴捕捉现象。高掺杂浓度的 InP 层构成电场控制层,成为吸收层的低电场和倍增层的高电场之间的电场过渡^[8]。

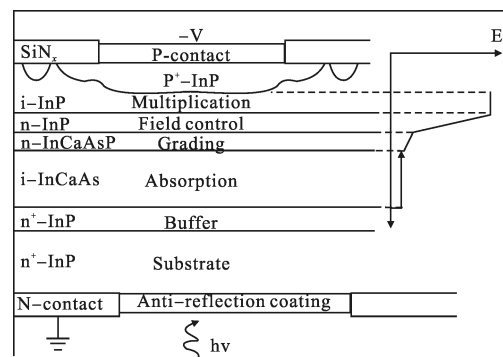


图 1 吸收层、保护层和倍增层分离的 InGaAs/InP APD 结构

Fig.1 Absorption layer, protective layer and multiplication separation of InGaAs/Inp APD structure

InGaAs-APD 的工作模式有两种:线性模式(Linear mode)和盖革模式(Geiger mode)。

线性模式的 InGaAs-APD 的工作原理是 APD 的偏置电压略低于击穿电压(VBD),约为 0.9~0.95 VBD。由于输出与输入的大小满足线性条件,所以称之为线性模式。但这种模式下得到的脉冲值非常小,不便于测量。

盖革模式的 InGaAs-APD 的工作原理是 APD 的偏置电压高于击穿电压。当单光子雪崩二极管处于静止工作状态时,耗尽层会产生一个很强的电场,但没有自由电荷存在;当光子进入电场中时会产生电子空穴对,电荷就被电场加速并发生碰撞产生新的电荷空穴对,形成一个自维持的雪崩倍增过程,并产生很大的雪崩电流,可以方便地被后续电路检测到。由于空间电荷效应的限制,电流增加到一定程度就会饱和,电流大小维持不变,此时的单光子雪崩二极管处于开启状态,会有毫安量级的电流流过二极管。当雪崩电流达到毫安量级的电流时,将对雪崩光

电二极管造成极大的危害,甚至直接烧毁。故需要对处于开启状态的单光子雪崩光电二极管增加驱动电路,使反向偏置电压在一段时间内降低到雪崩电压以下,使雪崩淬灭,单光子雪崩二极管逐渐恢复,然后驱动电路恢复反向偏置电压高于单光子雪崩二极管击穿电压,为探测下一个单光子到来,再次产生雪崩,这段淬灭和恢复时间,称之为死时间(Dead Time)。

2 电路设计

在单光子探测系统中,采用门控模式和限流电阻可以在一定时间内使用雪崩光电二极管(APD)两端电压低于反向击穿电压,但这段时间不足以捕获载流子完全释放,故需要死时间控制模块对其进行控制,减小后脉冲概率。因此,单光子读取电路的设计主要包括以下几个方面:门控脉冲产生模块、死时间控制模块和雪崩信号提取电路。

2.1 单光子读取电路系统设计

图 2 是单光子探测器系统设计图,其中虚线框内是单光子读取电路部分。信号发生器产生触发脉冲一分为二,一路脉冲信号经过延时 1,匹配电信号和光信号到达 SPAD 的时间,确保 SPAD 两端的偏压大于 SPAD 的反向击穿电压时,刚好有光子进入,随后脉冲进入 1550nm 激光器。激光器输出的激光经过衰减器衰减后,由光纤接入 SPAD。另外一路脉冲信号经延时 2 进入电平转换模块(TTL 至 ECL)。经电平转换的信号分为三路,分别用于产生脉宽可调的门控脉冲,与比较锁存器输出的一路信号一起控制死时间和经过延时 3 作为比较锁存器的控制信号。调节延时 3 可以调节锁存器的锁存边缘捕获雪崩信号。

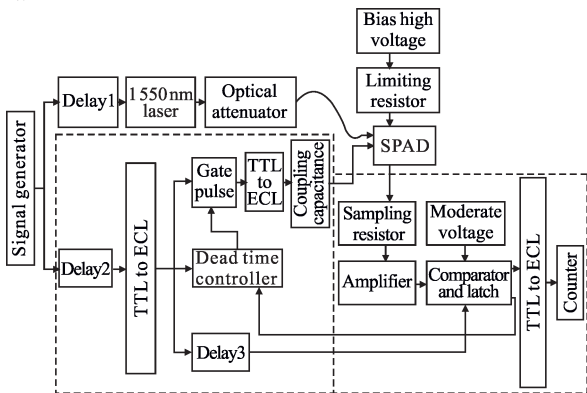


图 2 单光子探测器系统设计图

Fig.2 Schematic diagram of single-photon detector

2.2 门控脉冲产生模块

门控脉冲的宽度越窄,则 SPAD 两端的偏压超过其反向击穿电压的时间越短,发生雪崩后抑制的越快。因此门控脉冲宽度是单光子读取电路系统中的一个重要参数。设计了脉冲可调脉冲发生器,可以根据系统需求随时调整,也可以通过实验测试单光子探测性能与脉冲宽度的关系。

门控脉冲设计原理图如图 3 所示。A 是系统时钟经电平转换后的 ECL 正信号,利用两个 ps 级精度的可编程 ECL 延时芯片分别对 A 进行两路不同的延时,比如一路延时 2 ns 产生了 B 路信号,另一路延时 12 ns 产生了 C 路信号,C 与 D 为一对 ECL 信号,将 B 与 D 相与,即可产生脉冲宽度为 10 ns、周期与 A 一致的脉冲信号 E。经过调节 B 和 C 的延时,即可调节 E 的脉冲宽度。

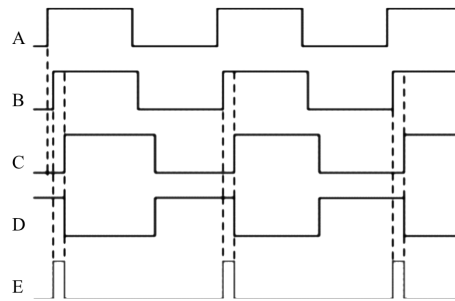


图 3 门控脉冲设计原理图

Fig.3 Schematic diagram of gate pulse

2.3 死时间控制模块

死时间是单光子读取电路中另外一个重要的参数。设置合理的死时间,可以有效的减小后脉冲概率和暗计数,但是死时间不能设置过长,否则会限制单光子读取电路的工作频率。

死时间控制模块设计原理图如图 4 所示,A 是系统时钟经过电平转换后的 ECL 正信号,首先将其分频,这里假设 A 的周期是 100 ns,分频后 A1 的周期是 200 ns。分频后级联两个 ECL 电平的 D 触发器,A1 和/A1 作为两个 D 触发器的控制时钟。第一个 D 触发器的 D 端固定接 ECL 高电平(HPECL),Q 端作为第二个 D 触发器的 D 端输入,两个 D 触发器均由雪崩信号作为复位信号,高电平复位。在正常状态下,由于 D 端固定高电平输入,F 信号一直为高电平,复位时,保持一定时间的低电平后再变为高电

平。将死时间信号 F 与图 3 产生的门控脉冲 E 相与,输出 Out 作为 PGA-400 的门控脉冲,当发生雪崩时就会产生主动的死时间控制,有效地淬灭雪崩。

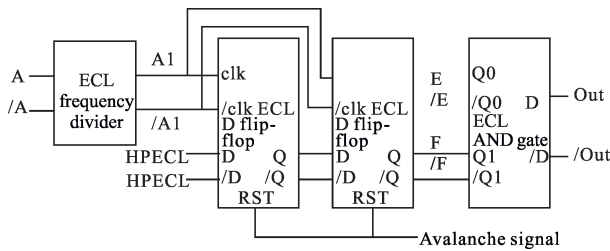


图 4 死时间控制模块设计原理图

Fig.4 Schematic block of dead time

死时间控制时序图如图 5 所示。若复位信号(即雪崩信号)在 M 点到来,信号 F 复位成低电平,经过两个 A1 的上升沿,约 200 ns,上升为高电平,即图中的 FM;若复位信号在 N 点到来,信号 F 也复位成低电平,经过两个 A1 的上升沿,约 400 ns,上升为高电平,即图中的 FN。由于雪崩信号反馈回来的时间不确定,死时间控制在 200~400 ns 的范围内。通过调节分频器的分频数, A1 的周期会发生转变,即可调节死时间的宽度。

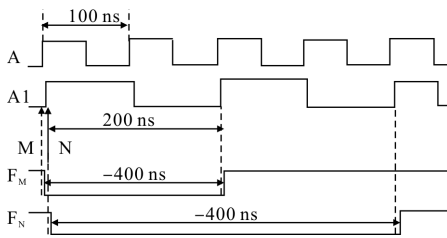


图 5 死时间控制时序图

Fig.5 Schematic time diagram of dead time

2.4 雪崩信号提取模块

该单光子读取电路中,采用边沿锁存的方法锁存雪崩信号。单光子边沿锁存原理图如图 6 所示。图中深色颜色的曲线是雪崩二极管结电容产生的尖峰信号,浅色的曲线为捕获的雪崩信号,另外一条为比较锁存芯片的控制信号。当比较锁存信号为低电平时,将 SPAD 的响应信号与鉴别电平比较,高电平时,将比较结果锁存输出。若有雪崩信号则输出高电平,若无雪崩信号则输出低电平。在比较锁存器之后加上信号调节器,确保在低电平的比较期间,输出维持在低电平;在高电平的锁存期间,输出与锁存器的输出一致,以避免误计数和漏计数。

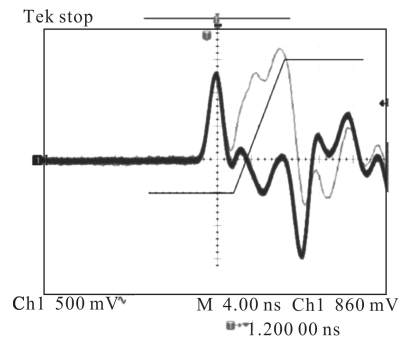


图 6 单光子边沿锁存原理图

Fig.6 Schematic diagram of edge flip-flop of single-photon-diode

3 实验结果

单光子读取电路初次测试过程中,激光器激光波长 1 550 nm,门控频率 1 MHz,单光子探测器是 PGA-400InGaAs 雪崩光电二极管。在工作温度为-55℃、脉冲宽度 10 ns 时,测试得到的暗计数率(Dark Count Rate, DCR)和量子探测效率(Quantum Detection Efficiency, QDE)与偏压的关系如图 7 所示。随着偏压的增加,暗计数率和量子探测效率都得到提高。当偏压持续增加到约 62.7 V 时,暗计数率的增幅超过量子探测效率增幅。

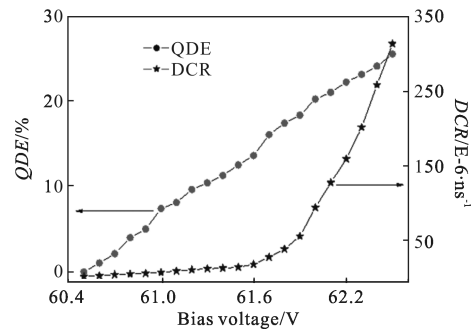


图 7 暗计数、量子探测效率与偏压的关系

Fig.7 Dark count and quantum detection efficiency relation with bias voltage

不同门控脉冲宽度下量子探测效率、暗计数与偏压的关系图如图 8 所示。门控频率为 10 MHz,门控宽度分别为 10 ns 和 5 ns,5 ns 门控对应的暗计数率要比 10 ns 门控下的暗计数率小。同一偏压下,10 ns 门控对应的量子探测效率要比 5 ns 门控下的量子探测效率高。但 10 ns 门控脉冲宽度条件下的最优性能参数为:量子探测效率约 20%,暗计数率 3.05×10^{-6} ;而 5 ns 门控脉冲宽度条件下的最优性能参数为:量子

探测效率约 9.26%, 暗计数率 5.5×10^{-7} 。

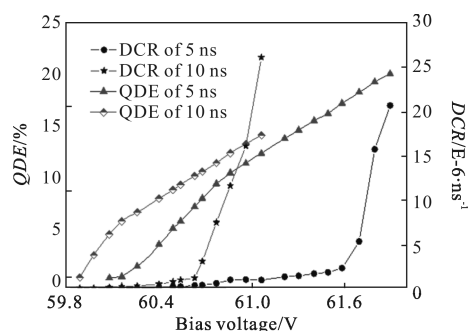


图 8 不同门控宽度下量子探测效率与偏压的关系

Fig.8 Dark count and quantum detection efficiency relation with bias voltage at different gate pulse width

4 结论

在近红外单光子读取电路设计上,主要采用脉冲延时、边沿锁存的方法来捕获雪崩信号,门控脉冲、死时间可以根据实验需要可调,提高了电路的动态采集范围,增强了抗干扰能力。实验证明,该方法设计合理、有效。实验后续将继续测试暗计数、量子效率与偏压的关系,同时测试暗计数、量子效率与温度的关系,不断提高门控频率以达到 1GHz。另外,期望将该方法用于单光子阵列集成探测器中,以减小探测器体积,降低功耗,提高电路传输控制速度,进一步促进单光子探测技术创新,加速国内单光子探测技术的发展。

参考文献:

- [1] Sun Zhibin, Ma Haiqiang, Lei Ming, et al. A single-photon detector in the near-infrared range [J]. *Journal of Physics*, 2007, 56(10): 5790–5795. (in Chinese)
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.
- [2] Du Keming. Mutual technology of high speed single-photon detection and the studies of weak optical imaging[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research of Chinese Academy of Sciences, 2011: 1–2. (in Chinese)
杜克铭. 高速单光子探测互差分技术及弱光成像研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011: 1–2.
- [3] He Wei. The studies of near-infrared single-photon detector in quantum secure communication [D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research of Chinese Academy of Sciences, 2012: 9–20. (in Chinese)
何微. 量子保密通信中的近红外单光子探测器研制 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2012: 9–20.
- [4] Zhang Pengfei, Zhou Jinya. Single photon detector and their development[J]. *Sensor World*, 2003, 9(10): 6–10. (in Chinese)
张鹏飞, 周金亚. 单光子探测器及其发展 [J]. 传感器世界, 2003, 9(10): 6–10.
- [5] Yang Hao, Wang Chao, Sun Zhibin, et al. High speed single-photon detector at 1550 nm wavelength[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 325–329. (in Chinese)
杨皓, 王超, 孙志斌, 等. 高速近红外 1550 nm 单光子探测器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 325–329.
- [6] Sun Zhibin, Huang Zhen, Ye Weiran, et al. Overview of the photonic communication in deep space, free space, and underwater communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2424–2431. (in Chinese)
孙志斌, 黄振, 叶蔚然, 等. 深空、自由空间、非可视散射和 水下激光光子通信[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2424–2431.
- [7] Tsang W T. Semi-Conductive Optical Detector [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. (in Chinese)
Tsang W T. 半导体光检测器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [8] Nishida K, Taguchi K, Matsumoto Y. InGaAsP heterostructure avalanche photodiodes with high avalanche gain [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 35(3): 251–253.