光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.005

多模光纤耦合 InGaAsP/InP 单光子探测器模块

崔大健*，张　承，赵江林，敖天宏，李艳炯，严银林

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对 1 064 nm 波段高灵敏激光测距应用，设计了一种由单光子雪崩光电二极管（SPAD）、微型热电制冷器（TEC）、主动淬灭主动恢复电路（AQAR）、温控单元、高压单元、FPGA 等混合集成的高性能单光子探测器模块。SPAD 芯片采用了分离吸收渐变电荷倍增（SAGCM）的 InGaAsP/InP 材料结构设计，内部电场分布经 Matlab 软件仿真，结果显示该结构具有良好的增益特性。SPAD 芯片通过 TEC 制冷保持低温工作来降低暗计数以抑制器件的噪声。低延迟 AQAR 由高速比较器与宽带放大器构成，淬灭时间约为 1.2 ns，有效减少了后脉冲效应。测试结果表明，在－30 ℃，探测效率为 30.2％下，暗计数率仅为 1.9 kHz，在死时间为 0.8 μs 时，后脉冲为 10.4％。通过集成化设计的单光子探测器模块具有探测效率高和暗计数率低的优势，能够满足小型化激光测距应用需求。

关键词： 集成制冷；单光子雪崩光电二极管；激光测距；AQAR

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0327－05

Multimode Fiber-coupled InGaAsP/InP Single Photon Detector Module

CUI Dajian，ZHANG Cheng，ZHAO Jianglin，AO Tianhong，LI Yanjiong，YAN Yinling

（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： Aiming at the application of highly sensitive laser ranging in the 950～1 100 nm band，a high-performance single-photon photodetector module which is hybrid integrated with single-photon avalanche photodetector（SPAD），miniature thermoelectric cooler（TEC），active quenching and active recovery circuit（AQAR），temperature control unit，high-voltage unit and FPGA. The SPAD chip adopts the InGaAsP/InP material structure design that separates and absorbs the gradual charge multiplication. The internal electric field distribution is simulated by Matlab software，and the results show that the structure has good gain characteristics. The SPAD chip keeps working at low temperature through TEC refrigeration，reduces the dark count and improves the overall performance. The low-latency AQAR is composed of a high-speed comparator and a bandwidth amplifier. The quenching speed is about 1.2 ns，which can effectively reduce the post-pulse effect. The test results show，the detection efficiency is 30.2％ when the temperature is －30 ℃ and the dark count rate is 1.9 kHz. The post pulse is 10.4％ when setting the dead-time as 0.8 μs. The designed detector characterized by high detection efficiency and low dark count rate，can be applied in miniaturized laser ranging.

Key words： integrated refrigerated；single photon avalanche photodiode；laser ranging；AQAR

收稿日期：2021－02－10.

* **通信作者：**崔大健

0 引言

近年来，高性能雪崩光电探测器已被广泛用于激光测距等领域[1-3]。然而，传统激光测距系统用探测器大多工作在线性模式下，需要回波能量大，回波光子数要求在几十至几百以上，需要大功率激光光源，导致难以通过集成来减小系统体积与功耗。

单光子探测器工作在击穿电压之上的过偏压盖革模式下，能够探测到单个光子信号，与传统线性光电探测器相比，其灵敏度提高了 2～3 个数量级，可极大地降低对激光器能量和光学结构的要求，符合集约化器件的发展趋势，更利于在超灵敏、长距离的激光测距中应用。然而，由于盖革模式下雪崩电流具有自持特性，为防止过流损坏需要抑制雪崩电流。常用的雪崩抑制模式主要有：被动淬灭、主动淬灭和门控模式。其中被动淬灭的后脉冲大、恢复时间长，而门控模式主要针对光子同步到达场景，不适用于测距目标位置不确定、光子到达时间未知的探测方式。而主动淬灭不仅能够实现对光子到达时间未知的探测，而且能通过外围电路检测雪崩信号并迅速抑制雪崩，随后立即对 SPAD 快速充电，使其恢复至盖革模式。但此种淬灭方式的淬灭时间受限于外围电路的延迟，因此对低延迟主动淬灭电路提出了迫切需求。

本文针对 1 064 nm 激光测距对单光子探测器高性能集成小型化的应用需求，设计了一种由 InGaAsP/InP 单光子雪崩光电二极管（SAPD）、低延迟高速主动淬灭恢复电路、微型热电制冷器混合集成的高性能单光子探测器测距模块。该模块工作在自由工作模式下，适用于光子到达时间未知的连续探测激光测距。

1 器件设计

本文设计的单光子探测器模块的结构框图如图 1 所示，由集成制冷封装的 InGaAsP/InP 单光子探测器、温控电路、主动淬灭主动恢复（AQAR）电路、高压电路、比较阈值电路，以及 FPGA 等组成。其中，InGaAsP/InP SPAD 探测器内部集成有制冷器（TEC）与温敏电阻，通过温控单元可以实现 InGaAsP/InP SPAD 在低温下工作，以减小 SPAD 的暗计数；AQAR 电路、高压电路和比较阈值电路相结合共同完成 InGaAsP/InP SPAD 的雪崩信号检测、雪崩淬灭以及盖革模式控制等功能，使得 SPAD 能够对到达时间未知的光子进行高灵敏实时探测。

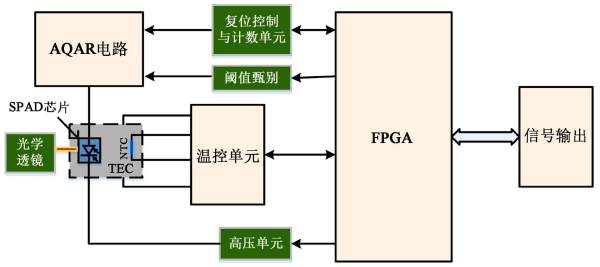
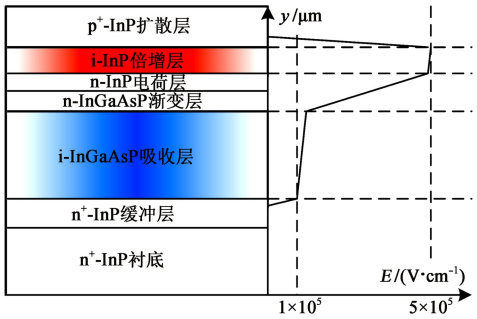


图 1 单光子探测器模块结构框图

2 InGaAsP/InP SPAD 芯片设计

InGaAsP/InP SPAD 外延材料采用典型的吸收、渐变、电荷、倍增层分离（SAGCM）结构[4-5]，如图 2 所示，从下往上依次为 n^+-InP 缓冲层、i-InGaAsP 吸收层、n-InGaAsP 渐变层、n-InP 电荷层、i-InP 倍增层和 p^+-InP 扩散层。其中，吸收层为与 InP 晶格匹配的 $In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.43}P_{0.57}$，其截止波长为 1.2 μm，对 1 064 nm 波长光的吸收系数为 1.37×10^4 cm^{-1}，厚度为 1.5 μm。通过调整电荷层的掺杂浓度、调节内部电场分布可使电场强度集中在 InP 倍增区。



（a） 剖面结构 （b） 电场分布

图 2 InGaAsP/InP SPAD 芯片剖面结构与电场分布图

为提高单 SPAD 的探测效率，设计如图 3 所示的集成反射层结构。该结构 SPAD 由平面型 SPAD 和具有高反射率的介质-金属反射层构成。介质-金属反射层位于光敏区的顶部，来自衬底侧入射的光子通过吸收区后，未吸收的光子被顶部的反射层反射回来，在吸收层重新被吸收，增强了光的量子效率。反射层由金属层和介质层组成，其中介质层位于金属层与 InP 材料之间，利用反射光在半导体-介质界面和介质-金属界面的干涉，增强光的反射效率。采用最优介质膜厚度，计算并绘制反射层的反射率与入射光波长、角度的关系图，如图 4 所示。图

4(a)为不同入射角度入射光，经反射层对入射光的 s 偏振和 p 偏振分量的反射率。在垂直入射时，s 偏振和 p 偏振方向的反射率相同，反射率均值最大。图 4(b)为在垂直入射时，反射率与入射波长的关系曲线。结果显示，在光垂直入射的情况下，介质-金属反射层对 1 064 nm 入射光子的反射率达 91%。

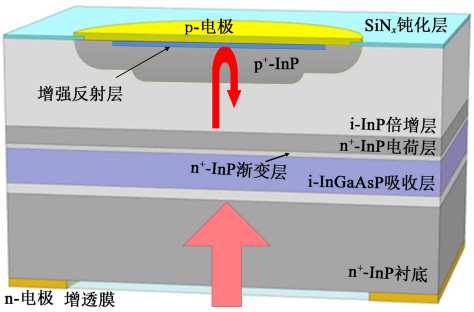
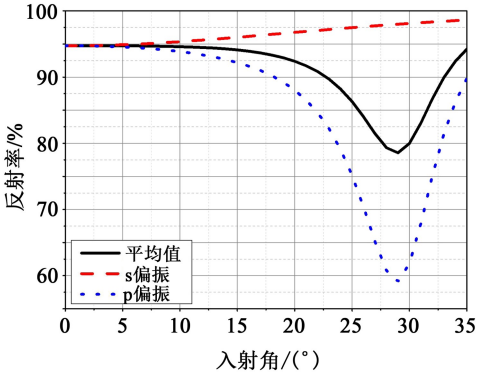
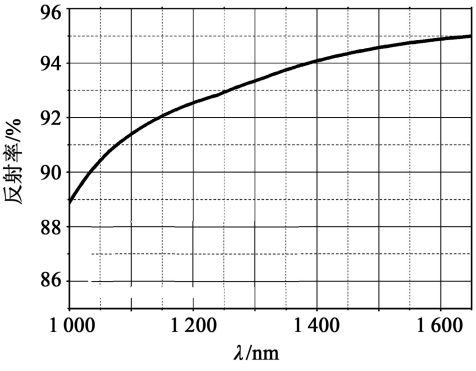


图 3　InGaAs/InP SPAD 结构示意图



(a)　反射率与入射光角度的关系曲线



(b)　反射率与入射光波长的关系曲线

图 4　反射层的反射率与入射光角度、波长的关系曲线

为了验证反射层设计的有效性，设计并制作相同吸收层厚度、反射层结构的 SAPD 芯片，并测试 1 064 nm 入射光子的光响应度。测试制作反射层前后 SPAD 的 *I-V* 曲线，如图 5 所示。可以看出，在相同测试条件下，带反射层 SPAD 和不带反射层 SPAD 在拉通电压处的光响应电流分别为 1.3 和 1.09 μA，结构优化后 SPAD 的响应度提高了 19.2%。

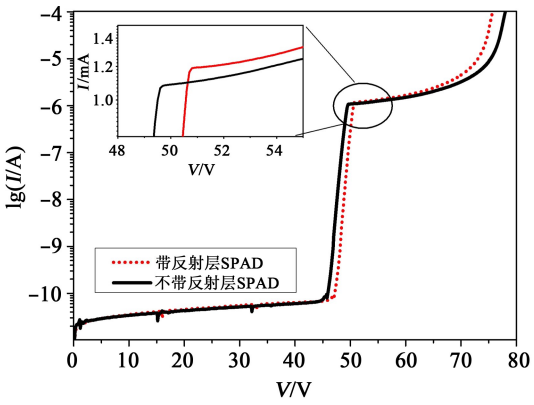


图 5　集成反射层 SPAD 芯片的典型 *I-V* 曲线

3　主动淬灭主动恢复电路(AQAR)

AQAR 负责完成雪崩抑制、淬灭恢复、雪崩信号提取与数字化输出等功能，其设计的关键是要提高淬灭速度，淬灭速度越快，探测器雪崩持续时间越短。AQAR 采用低延迟高速比较器与射频放大器相组合的结构来实现[6-8]。其中，带有差分锁存控制、输入到输出延迟典型值为 250 ps 的 ADCMP567 高速比较器完成对雪崩信号的鉴别；宽带高增益、低噪声放大器 ASL51T8 实现对 InGaAsP/InP SPAD 偏置电压的控制；FPGA 控制 InGaAsP/InP SPAD 的死时间。电路的工作时序如图 6 所示。AQAR 检测到雪崩信号后，FPGA 内部计时电路开启，当计时时间达到设定值后，FPGA 发出复位脉冲，比较器退出锁定状态，输出端电平再次发生翻转，SPAD 芯片的 p 端电平降低至 0 V，恢复盖革模式，等待下一次检测。模块的雪崩信号输出为 LVTTL 信号，信号高电平宽度为设定的死时间宽度，通过检测信号上升沿，完成雪崩信号检测。

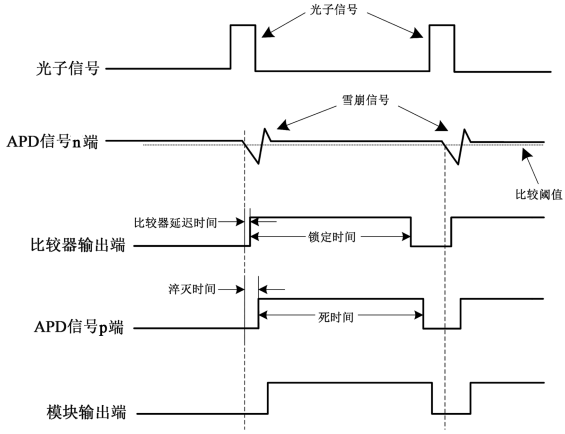


图 6　AQAR 工作时序图

图 7 为雪崩信号脉冲波形图，从图中可以读出 AQAR 电路的淬灭时间约为 1.2 ns。越快的淬灭速度越有利于降低雪崩区电荷量，减轻后脉冲效应。

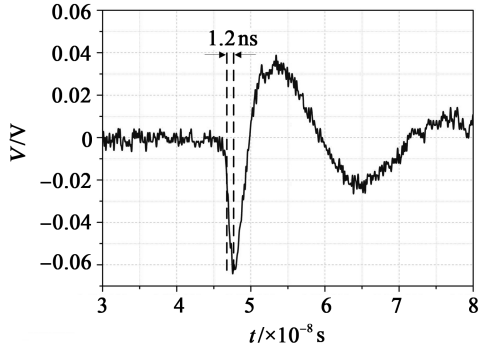


图 7 主动淬灭雪崩信号脉冲波形

4 集成制冷封装

模块的核心是单光子探测器，其由 InGaAsP/InP SPAD 芯片、热敏电阻、氮化铝陶瓷基板、TEC、TO 金属管壳组成。模块可以通过温控电路监控 SPAD 的工作温度，使其始终处于低温工作环境，减少二极管暗计数，温度控制精度达到 0.1 ℃。

模块采用多层 PCB 板将 AQAR 电路、温控单元、FPGA、高压单元集成在钨铜金属外壳中，实现小型化封装[9-11]。其中，通信/电源接口既可以为探测器提供电源，也能够进行通信控制，数据接口用于数据输出和信号控制。采用多模光纤接口，可外接法兰盘。整个模块尺寸为 3.5 cm × 3.5 cm × 5.1 cm。

5 器件性能测试

搭建测试平台，对 InGaAsP/InP 单光子探测器模块进行了性能测试，关键参数包括单光子探测效率(PDE)、暗计数率(DCR)和后脉冲概率(APP)。激光器型号为 PDL800-B，波长为 1 064 nm，设置重复频率为 100 kHz。光信号经过衰减器，将单脉冲光子数衰减到 0.1 个光子。探测器模块工作在自由模式，外接计数器进行光子计数。上述三个关键参数的计算公式如下：

$$PDE = -\frac{1}{\mu}\ln\left(1-\frac{N_p}{t\times f_p}\right) \tag{1}$$

$$DCR = \frac{N_d}{t} \tag{2}$$

$$APP = \frac{N_{app}-(1-f_p\times\tau_h)\times N_d}{N_p-\frac{N_d}{f_g}} \tag{3}$$

其中，N_p 为有光情况下计数值，N_d 为无光情况下计数值，N_{app} 为后脉冲计数值，f_p 为激光器重复频率，t 为统计时间，τ_h 为死时间。

单光子探测器的探测效率随偏置电压变化的测试结果如图 8 所示。结果显示，单光子探测效率随偏置电压的提高呈线性上升，在偏置电压为 76.8 V 时，探测效率达到 30.2%。

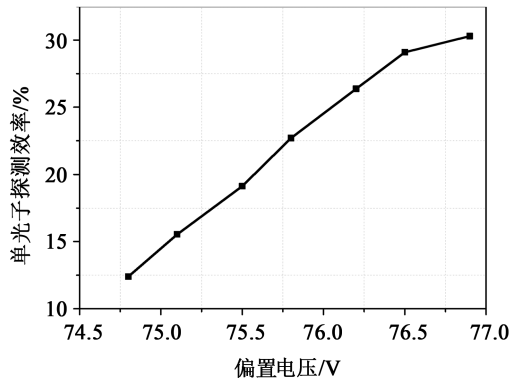


图 8 探测效率随偏置电压的关系

图 9 为暗计数率随探测效率的变化曲线，模块设置死时间为 0.8 μs。在探测效率为 25%时，暗计数率为 1.25 kHz，当探测效率增大至 30.2%，暗计数率约为 1.9 kHz。从图中可以看出，继续增加探测效率，暗计数率增大明显，这是由于后脉冲影响暗计数增加幅度变大。

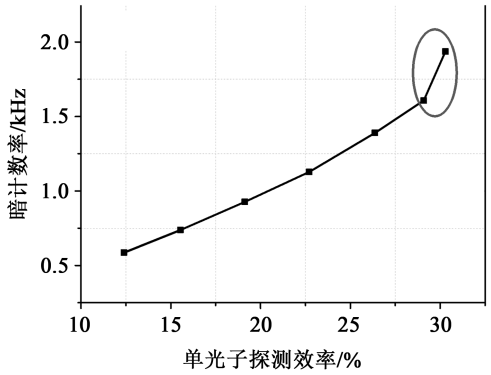


图 9 暗计数率随探测效率的变化

图 10 为后脉冲概率(APP)随探测效率的变化曲线。可以看出，随着探测效率的增加，后脉冲逐渐增加，这是由于高偏压下，SPAD 芯片内部的材料缺陷会捕获更多的载流子。当探测效率为 30.2%时，后脉冲概率为 10.4%。

探测器模块具体参数如表 1 所示。

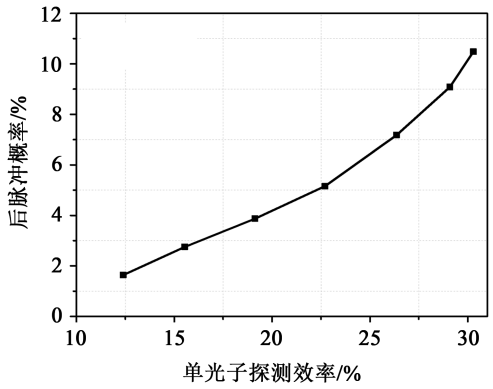


图 10　后脉冲随探测效率的变化

表 1　探测器模块主要参数

参数	数值
光谱范围 λ/nm	950～1 170
光子效率[1]@1 064 nm/%	30.2
暗计数率[1]/kHz	1.9
后脉冲[1]@τ=0.8 μs/%	10.4
时间抖动[1]/ps	312
死时间调节范围/μs	0.2～3.0(步进 0.05)

备注：上标“1”表示测试温度为－30 ℃

6　结论

本文设计并研制了一种高性能 1 064 nm 波长 InGaAsP/InP 单光子探测器模块。通过集成反射层结构优化后 SPAD 芯片的响应度提高了 19.2%；采用 AQAR 电路，淬灭速度约为 1.2 ns，快速淬灭电路可以抑制 SPAD 芯片的后脉冲效应。实际测结果显示，在－30 ℃制冷温度下，探测器的单光子探测效率可达 30.2%，暗计数率为 1.9 kHz，0.8 μs 死时间下的后脉冲为 10.4%。测试结果表明，研制的单光子探测器模块具有高探测效率、低暗计数和低后脉冲优点，能够满足高灵敏度、远距离激光测距应用需求。

参考文献：

[1] Villoresi P, Jennewein T, Tamburini F, et al. Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and earth[J]. New J. of Phys., 2008, 10: 033038.

[2] Albota M A, Heinrichs R M, Kocher D G. Three dimensional imaging laser radar with a photoncounting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. Appl. Opt., 2002, 41(36): 7671-7678.

[3] Orlov D A, Glazenborg R, Ortega R, et al. UV/visible high-sensitivity MCP-PMT single-photon GHz counting detector for long-range lidar instrumentations[J]. CEAS Space J., 2019, 11: 405-411.

[4] Peacock A, Verhoeve P, Rando N, et al. Single optical photon detection with a superconducting tunnel junction[J]. Nature, 1996, 381: 135-137.

[5] Goltsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. Appl. Phys. Lett., 2001, 79: 705-707.

[6] Wu G, Xu L, Chen J, et al. Fiber-coupled near-infrared single-photon spectrum analyzer based on a InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detector[J]. J. of Mod. Opt., 2009, 56(2): 296-298.

[7] Jiang X. InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2007, 13(4): 895-905.

[8] Sudharsanan R, Salisbury M. Single photon counting Geiger mode InGaAs(P)/InP avalanche photodiode arrays for 3D imaging[J]. Proc. of SPIE, 2008, 6950: 69500N-69500N-9.

[9] Meng W D, Tang K, Deng H, et al. Research and experiment of satellite laser ranging with 1 064 nm wavelength[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): S112006.

[10] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C F, et al. Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5 μm photon counting applications[J]. J. of Mod. Opt., 2007, 54(2): 283-304.

[11] Thew R T, Stucki D, Gautier J D, et al. Free-running InGaAs/InP avalanche photodiode with active quenching for single photon counting at telecom wavelengths[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91(20): 201114-1-201114-3.

作者简介：

崔大健(1982－)，男，硕士，高级工程师，主要从事光电子器件的研究。