

激光与光电子学进展

实时激光通信用自由运行 InGaAs/InP 单光子探测器(特邀)

童启夏^{1,2}, 雷勇^{1,2}, 申向伟^{1,2}, 谌晨^{1,2}, 陈伟^{1,2}, 赵江林^{1,2}, 任丽^{1,2}, 崔大健^{1,2*}, 汪亮³, 蔡善勇³¹重庆光电技术研究所, 重庆 400060;²量子信息芯片与器件重庆重点实验室, 重庆 400060;³北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 为实现高速、高灵敏度、低成本的激光通信, 优化改进一种新的 InGaAs/InP 单光子雪崩二极管 (SPAD) 以更好地使其应用于单个单光子探测器 (SPD) 探测的近红外激光通信系统。与上一代相比, 优化各层结构的同时, 在其中加入了介质-金属反射层并改进了双 Zn 扩散工艺。在 1.25 GHz 高频正弦门控 (SWG) 工作模式、225 K 温度和 6 V 偏置下, 所制备的 InGaAs/InP SPAD 实现了光子探测效率 (PDE) 为 30%、暗计数率 (DCR) 为 3 kHz 和后脉冲概率 (P_{ap}) 为 2.4% 的单光子性能。将基于高性能 SPAD 制备的自由运行负反馈雪崩二极管 (NFAD) 作为接收机, 应用到已有实时激光通信系统中, 实验得到了单个 NFAD 的激光通信性能参数。结果表明, 在使用 4 进制脉冲相位调制 (4PPM) 方案中, 在 1 Mbit/s 比特率条件下, 单个 InGaAs/InP NFAD 具有 1.1×10^{-5} 误码率和 -69.6 dBm 灵敏度。

关键词 InGaAs/InP; 单光子探测器; 单光子雪崩二极管; 负反馈雪崩二极管; 光子探测效率; 激光通信

中图分类号 O472+.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240893

Compact Free-Running InGaAs/InP Single-Photon Detector for Real-Time Space Laser Communication (Invited)

Tong Qixia^{1,2}, Lei Yong^{1,2}, Shen Xiangwei^{1,2}, Chen Chen^{1,2}, Chen Wei^{1,2}, Zhao Jianglin^{1,2}, Ren Li^{1,2}, Cui Dajian^{1,2*}, Wang Liang³, Cai Shanyong³¹Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;²Chongqing Key Laboratory of Quantum Information Chips and Devices, Chongqing 400060, China;³State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract In this study, to achieve high-speed, high-sensitivity, and low-cost laser communication, we optimized and improved a new InGaAs/InP single-photon avalanche diode (SPAD) to better apply to the near-infrared laser communication system detected using a single single-photon detector (SPD). Compared with the previous generation, we added a dielectric-metal reflective layer and improved the double Zn diffusion process while optimizing the structure of each layer. The fabricated InGaAs/InP SPAD achieved a photon detection efficiency (PDE) of 30%, a dark count rate (DCR) of 3 kHz, and an afterpulsing probability (P_{ap}) of 2.4% under a high-frequency sine-wave gate (SWG) operating mode with a frequency of 1.25 GHz, temperature of 225 K, and bias of 6 V. A free-running negative feedback avalanche diode (NFAD) prepared based on the high-performance SPAD was used as a receiver in the real-time spatial laser communication system. The performance parameters of the laser communication system with the NFAD were experimentally obtained. The experimental results show that the InGaAs/InP NFAD with a bit rate of 1 Mbit/s using the 4-pulse position modulation (4PPM) scheme has a bit error rate of 1.1×10^{-5} and sensitivity of -69.6 dBm.

Key words InGaAs/InP; single-photon detector; single-photon avalanche diode; negative-feedback avalanche diode; photon detection efficiency; laser communication

1 引言

近年来,随着人类对地球外层空间的探索不断深

入,诸如地球轨道卫星与地面、月球、火星等长距离通信实验正不断展开并受到越来越广泛的关注^[1]。基于单光子探测器的激光技术和通信系统具有高探测灵敏

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-01-21; 录用日期: 2024-01-22; 网络首发日期: 2024-02-06

通信作者: *cuidj@cetccq.com.cn

度,已在可见光通信(VLC)^[2-3]、星地通信^[4-5]、深空光通信^[6-7]等领域产生应用。例如 2013 年,NASA 进行了月球激光通信演示(LLCD),实现了月球与地球之间的高速激光通信^[8]。并且其进一步的长距离光通信实验如激光通信中继演示(LCRD)^[9]、深空光通信(DSOC)项目^[10]和欧洲深空光通信系统(DOCS)^[11]也在陆续进行。因此,对需要长距离通信的深空终端和深空中继卫星,高灵敏度的单光子探测器(SPD)可能是一个较好的选择。一般地,基于 III-V 簇材料的 InGaAs/InP SPD 可分为在高频门控下工作的单光子雪崩二极管(SPAD)单元及其阵列和在自由运行模式下工作的负反馈雪崩二极管(NFAD)单元及其阵列^[12-14]。

SPD 通常工作在盖革模式下,利用其内部载流子碰撞电离形成的 $10^6 \sim 10^8$ 高内增益,可实现单光子级信号探测^[15]。同时 SPD 具有体积小、简单易用和成本低等特点,在光学和量子通信中得到了广泛的应用^[16-17]。由于位“1”或位“0”可以由 SPD 阵列中触发的单元数决定,所以一般激光通信系统常用阵列来消除死区时间的影响。Si SPD 阵列已用于提高激光通信系统的数据传输速率^[18-20],但其工作波长受限,无法探测短波红外(SWIR)光谱^[21]。超导纳米线探测器(SNSPD)在 SWIR 中具有如高量子效率、短死区时间等优点,且已在 LLCD 中实现激光通信^[8]。然而,SNSPD 的高成本、大体积、超低温工作的缺点使其主要应用在部分地面站点^[22]。总体而言,在 SWIR 范围 InGaAs/InP SPD 是一种常用且可靠的器件,其具有固态探测器的低成本、高可靠性、紧凑、易于使用和良好整体性能等优点^[23-26]。基于 InGaAs/InP SPAD 的 8×8 规格阵列,现已实现 1 photon/bit 的灵敏度和 14 Mbit/s 的传输速率^[27]。然而,SPD 阵列客观存在的各单元分割入射光信号功率、多个单元间串扰、像元填充因子减小等问题将导致 SPD 阵列的灵敏度下降。相反地,单个 SPD 可以完全接收聚焦后的光信号并避免以上问题。例如,2019 年 Wang 等^[28]使用 20 MHz 方波触发单个商用 InGaAs/InP SPAD,实现了 2 Mbit/s 的数据传输速率。在 2022 年,Tian 等^[29]用 1.8 GHz 正弦门控(SWG)猝灭单个 InGaAs/InP SPAD,分别实验验证了 -57.2 dBm、 -53.42 dBm 和 -51.06 dBm 的灵敏度和 1.4×10^{-3} 、 2×10^{-3} 和 3.5×10^{-3} 的误码率。另一方面,单个 SPD 比 SPD 阵列成本更低,仅用单个 SPD 来实现高数据速率传输是有较大潜力的。

为适应激光通信系统对探测器的低噪声要求,本文制作并优化了 InGaAs/InP SPD 结构。在器件制造中,在结构中加入介质-金属反射层和优化的双 Zn 扩散工艺,提高了量子效率,抑制了边缘电场,减小了暗电流和暗计数率(DCR),提高了光子探测效率(PDE),更能够降低后脉冲概率(P_{ap})。采用高频 SWG 猝灭电路对 SPAD 进行猝灭,低温下,当 SWG 频率为 1.25 GHz 时,所制造器件可实现 $\sim 30\%$ PDE、 ~ 3 kHz DCR 和

$\sim 2.4\%$ P_{ap} 的优异单光子性能。进一步,在空间激光通信系统中实时化地测试了由优异性能 SPAD 制备的 NFAD 的激光通信性能参数。在 4 进制脉冲相位调制(4PPM)方案中,系统中单个自由运行 NFAD 的传输速率达 1 Mbit/s,展示出 1.1×10^{-5} 的误码率和约 -69.6 dBm 的灵敏度。

2 器件设计与制作

使用的 InGaAs/InP SPD 结构如图 1(a)所示,具有典型的分离吸收、渐变、电荷和倍增异质结构(SAGCM)和阶梯 PN 结。InGaAs/InP SPD 芯片由金属有机化学气相沉积(MOCVD)外延工艺制备,其外延材料的背景杂质浓度控制在 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,电荷层表面电荷密度控制精度达 5%。Zn 源的双扩散过程是制作阶梯 PN 结的关键工艺,芯片结构中倍增区厚度的准确控制通过 ± 50 nm 高精度结深调节技术实现^[30],同时第二次 Zn 扩散窗口定义了有源区大小,直径约为 25 μm 。通过调整渐变层和电荷层的掺杂浓度来调节吸收层和倍增层中的电场分布。吸收层电场强度在 $1 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5$ V/cm 范围内调节,以保证光生载流子的饱和漂移速率,同时避免雪崩击穿。倍增层厚度在 1~1.5 μm 范围内调节,以实现高雪崩概率所需的 >400 kV/cm 电场强度,同时减小载流子输运时间和时序抖动。芯片结构中总耗尽区的总厚度为 ~ 3 μm 。位于阶梯掺杂区顶表面的 p 型电极和位于 InP 衬底背面 n 型电极分别为金属化工艺得到的 Ti-Pt-Au 和 Au-Ge-Ni 合金,可实现较小的接触电阻。

基于 SAGCM 和已报道的文献^[31-32],对之前的工作进行了进一步半导体参数设计和优化^[30],具体内容包括:1)在结构中加入具有高反射率的介质-金属反射层,以增强 SPD 对入射光的吸收,提高器件量子效率;2)优化双 Zn 扩散工艺,调整阶梯 PN 结深结宽,在 SPD 有源区中心形成均匀电场,抑制边缘击穿,从而减小暗电流、暗计数率和后脉冲概率。为了方便优化设计,应用半导体工艺器件模拟工具(TCAD) Silvaco 并结合实际器件测试数据,选择合适的物理参数值和载流子迁移率模型、温度相关性模型和 InP 的碰撞电离模型等来建立完整的电学仿真模型。基于这些模型,可精确评估 SPD 设计中任意变化对其击穿电压、电场和雪崩概率等参数的影响。

为了提高器件量子效率,在芯片结构中 PN 结区顶部加入 SiO_2 介质-金属反射层,如图 1 所示。由于半导体-介质界面和介质-金属界面之间反射光存在的干涉过程,反射率得到增强。因此,当入射光子从衬底入射穿过吸收层后,其中未被吸收的光子会被反射层反射并在吸收层得到重吸收,以此增大芯片整体吸收效率。优化后的介质层薄膜厚度约为 220~230 nm,对 1550 nm 入射光的反射率可达 95%^[24]。图 1(b)为带反射层和不带反射层的 InGaAs/InP SPD 在相同条件下

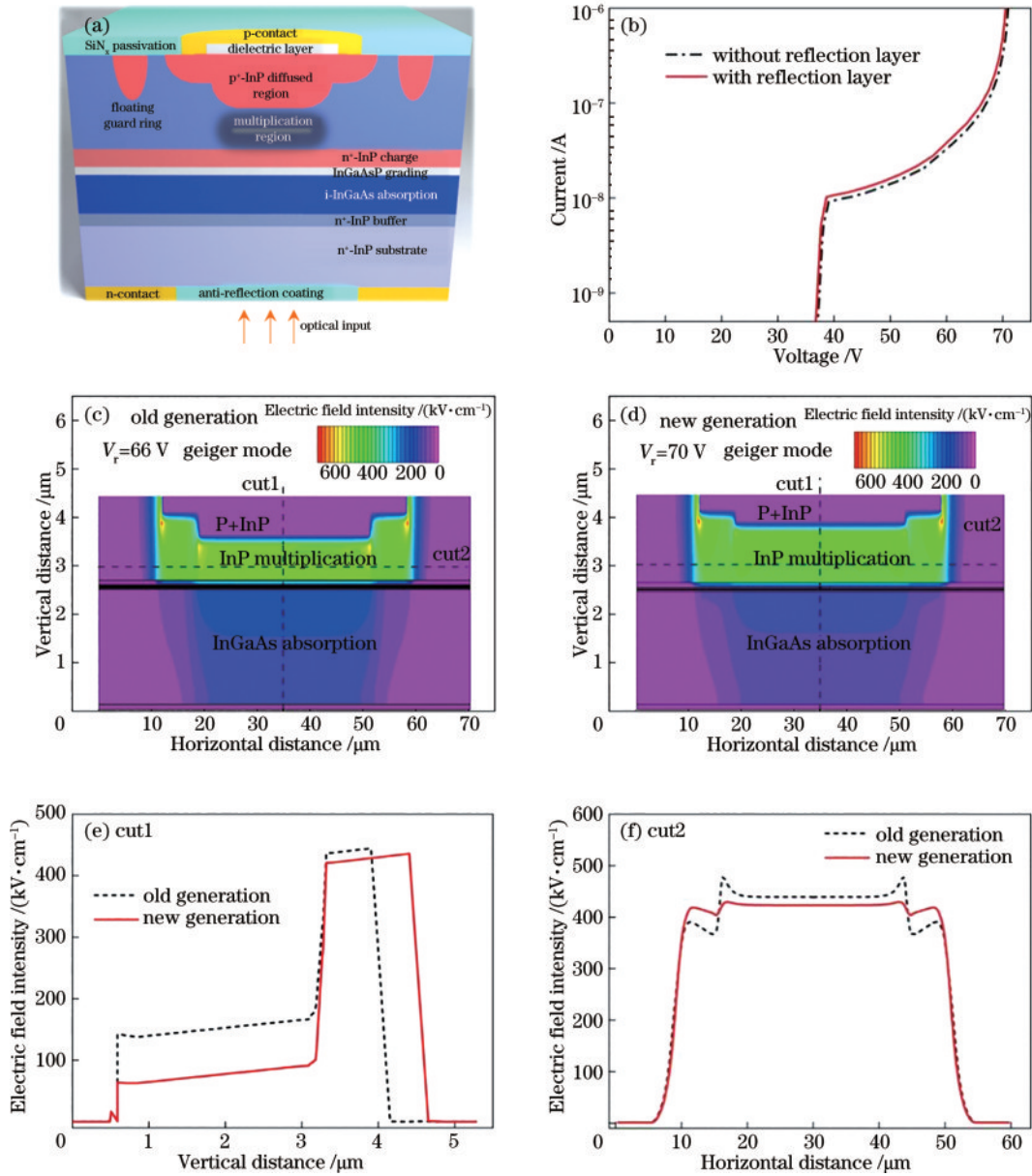


图 1 InGaAs/InP SPD 结构设计。(a)典型的 InGaAs/InP SPD 结构示意图；(b)具有反射层和无反射层时仿真的 InGaAs/InP SPD 的 I-V 曲线；(c)已有 InGaAs/InP SPD 结构在 66 V 时的电场分布；(d)改进的 InGaAs/InP SPD 结构在 70 V 时的电场分布；(e)位于图 1(c)和图 1(d)中 cut1 的垂直电场分布；(f)位于图 1(c)和图 1(d)中 cut2 的水平电场分布

Fig. 1 Structural design of InGaAs/InP SPD. (a) Schematic of the typical InGaAs/InP SPD structure; (b) simulated I-V curves of InGaAs/InP SPD with and without the reflection layer; (c) electric field profile at 66 V for the old generation InGaAs/InP SPD; (d) electric field profile at 70 V for the new generation InGaAs/InP SPD; (e) vertical electric field at cut1 in Fig.1(c) and Fig.1 (d); (f) horizontal electric field at cut2 in Fig.1(c) and Fig.1 (d)

仿真的光电流-电压(I-V)曲线,通过仿真得到的源光电流约为 12 nA;带反射层和不带反射层的 SPD 在穿透电压点处的光电流分别约为 10.5 nA 和 9.4 nA。由此计算的带反射层和不带反射层的 SPD 量子效率分别为 87.5% 和 78.3%,显然增加反射层可使器件量子效率相对提高约 10 个百分点。

与已有结构 InGaAs/InP SPD^[30]相比,改进的新结构采用增加电荷层电荷量和优化双 Zn 扩散过程的方式来减小暗电流、抑制边缘电场,仿真结果如图 1(c)~(f)所示。图 1(c)和图 1(d)分别为仿真的盖革模式下

已有 InGaAs/InP SPD 结构在反向偏压(V_r)为 66 V 时和改进 InGaAs/InP SPD 结构在 $V_r=70$ V 时各自电场分布示意图。引起两者电场分布不同的原因一方面来自于不同的双锌扩散条件,即调整了深扩散和浅扩散的深度,使改进器件具有较浅的锌扩散深度和更厚的倍增区。图 1(e)为由 cut1 线截取的新旧 SPD 垂直电场分布,对比可知倍增区电场强度从~460 kV/cm 减小到~420 kV/cm,这有助于减小倍增区中缺陷辅助隧穿(TAT)效应引起的 DCR^[33]。另一方面,器件电荷层电荷量的增加会导致 InGaAs 吸收层电场强度降

低,吸收层电场强度从 $\sim 1.5 \times 10^5$ V/cm 减小到 $\sim 1.0 \times 10^5$ V/cm,这有助于减小直接带隙 InGaAs 材料带间隧穿(BBT)引起的 DCR^[34]。图 1(f)为 cut2 线截取的新旧 SPD 倍增区中的水平电场分布,由有源区边缘电场的尖峰变得平缓可知,新器件结构可有效地抑制边缘强电场。

图 2 显示了在光功率(P_a)为 $1 \mu\text{W}$ 时 InGaAs/InP SPD 的暗电流和光电流测试数据。显然,随着温度从 300 K 下降到 213 K,器件的击穿电压(V_{br})从 ~ 71 V 下

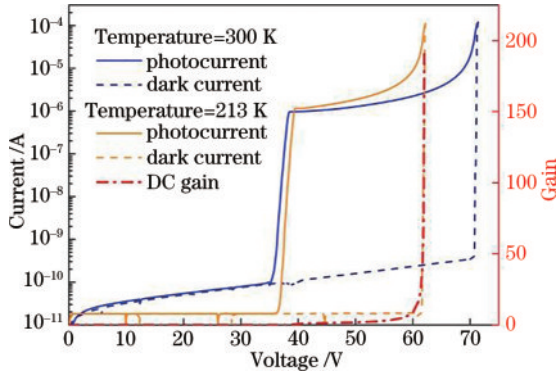


图 2 不同温度下入射光功率为 $1 \mu\text{W}$ 时测试的光电流、暗电流和计算的直流增益随反向偏压的变化曲线
Fig. 2 Measured photocurrent and dark current varying with reverse bias under illumination of light with optical power of $1 \mu\text{W}$ as well as the multiplication gain at different temperature

降到 ~ 62 V,温度系数约为 105 mV/K ^[33, 35]。在反向偏置电压 V_{br} 为 1 V 时,器件在温度为 300 K 和 213 K 时的暗电流分别为 $\sim 0.3 \text{ nA}$ 和 $\sim 18 \text{ pA}$,这种低温暗电流减弱主要是因为低温减弱了 InGaAs 吸收层的热生暗电流。如图 2 中 213 K 的直流增益曲线可知,在击穿电压附近,器件的直流增益($P_a=1 \mu\text{W}$)约为 200,大于商用 InGaAs/InP SPD (PGA-300)测试值^[29]。

3 单光子探测

采用单光子校准方案来表征制备的 InGaAs/InP SPAD 样品,即将 SPAD 置于 1.25 GHz 正弦门控模式下工作,应用时间相关单激光(TCSPC)技术测试光子探测效率(PDE)、暗计数率(DCR)、后脉冲概率(P_{ap})等单光子性能参数^[24]。为方便测试,将 SPAD 芯片、电路控制与温度控制等功能集成封装,得到了图 3(a)所示的单元 SPAD 模块,该模块电路原理如图 3(b)所示。该模块支持自由空间光窗、FC/PC 可插拔端口、多模光纤等多种光学接口,并配套了基于 Labview 开发的参数测试软件,如图 3(c)所示。SPAD 相关的详细测试系统和测试方法已在之前的工作中得到了描述^[33]。主要测试设置有:测试的温度范围为 300~200 K;正弦门控淬灭电路驱动 SPAD 的频率为 1.25 GHz,其最大振幅可达 30 V;应用 625 kHz 频率时钟调制 1550 nm 皮秒脉冲激光器,输出光脉冲的半峰全宽(FWHM)为 200 ps,调整衰减器使激光脉冲强度衰减到每脉冲平

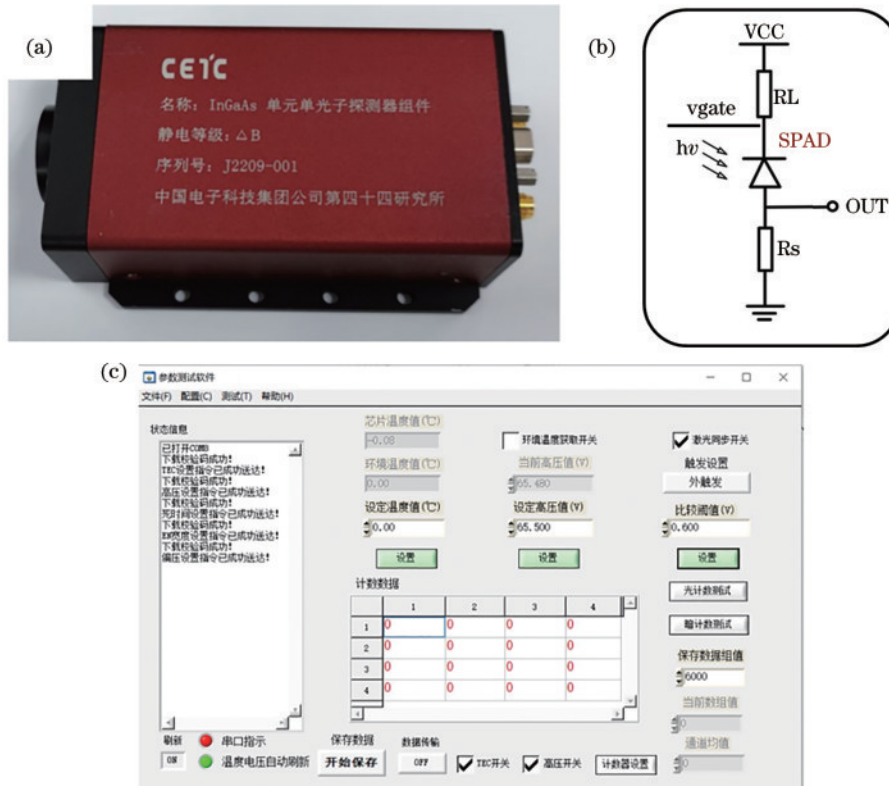


图 3 SPAD 样机及工作原理。(a)SPAD 模块样品;(b)SPAD 电路原理;(c)模块控制软件界面
Fig. 3 Sample and working principle diagram of SPAD. (a) SPAD module sample; (b) SPAD circuit principle; (c) module control software interface

均光子数为 1 的水平;为了消除后脉冲的影响,设置的死区时间约为 88 ns。

PDE、归一化 DCR 和 P_{ap} 的表达式^[24]分别为

$$V_{PDE} = \frac{1}{\mu} \ln \frac{1 - R_d/f_g}{1 - R_{ph}/f_1}, \quad (1)$$

$$V_{DCR} = R_d/f_g t_w, \quad (2)$$

$$P_{ap} = (R - R_d - R_{ph})/R_{ph}, \quad (3)$$

式中: μ 为每个激光脉冲的平均光子数; R_d 为无光照射时的测量的计数率; f_g 为门控频率; f_1 为激光重复频率; R_{ph} 为有光照射时的光子探测计数率; t_w 为有效门宽; R 为光照下总计数率。

图 4(a)显示了在不同温度下器件的 PDE 随过偏

压 (V_{ex}) 的变化。明显地,在温度为 300 K 时器件的 PDE 随 V_{ex} 在 0~8.7 V 范围内增加而增加,并在 $V_{ex} = 8.7$ V 时达到最大, PDE 约 40%;而在低温情况下 (213~243 K),器件的 PDE 同样随 V_{ex} 在 0~6.5 V 范围内增加而增加。当保持 V_{ex} 不变时,由图 4(a)可知器件的 PDE 随温度减小而增大,原因是温度减小将增加碰撞离化率,进而引起雪崩概率增大^[36-37]。图 4(b)和图 4(c)为 DCR 和 P_{ap} 分别随 PDE 变化的关系图,显然在相同 PDE 的情况下,DCR 和 P_{ap} 随着温度降低分别明显下降和快速增大。综上,该器件可实现较优秀的单光子性能,各参数分别为 ~30% PDE、~3 kHz DCR 和 ~2.4% P_{ap} 。

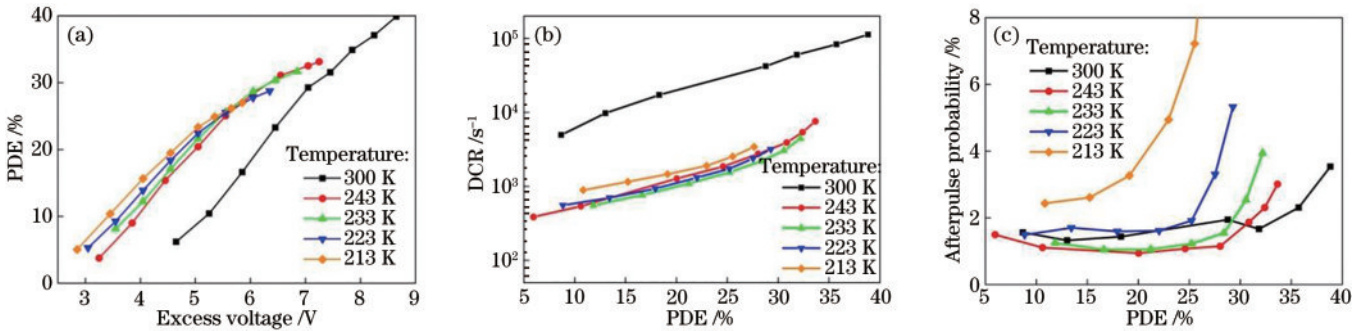


图 4 在不同温度下测试的 PDE 随过偏压变化的关系图、DCR 随 PDE 变化的关系图和 P_{ap} 随 PDE 变化的关系图

Fig. 4 PDE changing with overbias, DCR changing with PDE, and P_{ap} changing with PDE tested at different temperature

4 激光通信实验

由于工作在门控模式下的 SPAD 电路系统相对复杂,其较难直接应用于现有激光通信系统中,进一步采用在所制 SPAD 芯片上单片集成大电阻的方式制备操作简单的自由运行 NFAD 器件。NFAD 器件的详细制作过程和单光子性能表征已在之前的工作中报道,器件具有 40% 的 PDE、2300 s^{-1} 的 DCR、8% 的 P_{ap} 和 49 ps 的时间抖动^[38]。将所制备的高性能自由运行

NFAD 作为接收机应用到已有实时激光通信系统中,通过环回测试得到系统的误码率并验证系统的可行性及稳定性。误码率测试实验系统如图 5 所示,该系统可针对 4PPM 编码的人工码型提供 1 Mbit/s 业务速率和 2 Mbit/s 线路速率。如图 5 中虚线框所示,从左到右分别为现场可编程门阵列 (FPGA, XC7K325TFFG 900) 中用于编码的发送端 (Tx) 和解码的接收端 (Rx)。当伪随机二进制序列 (PRBS) 由 PC 端发出到 Tx, PRBS 经由 FPGA 用 4PPM 编码调制后驱动 1550 nm

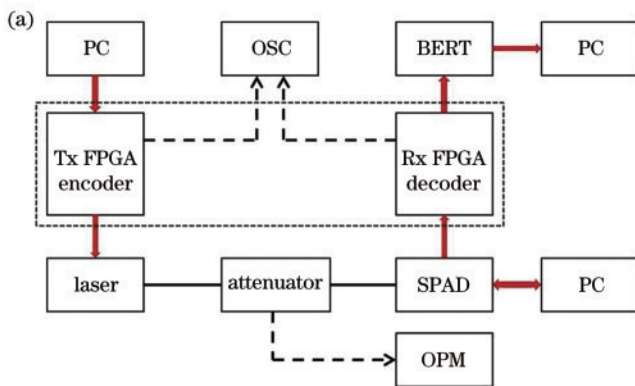


图 5 SPAD 激光通信实验。(a) 激光通信实验装置原理图; (b) 收发一体功能的 FPGA 模块

Fig. 5 Experiment of SPAD laser communication. (a) Experimental setup of laser communication experimental device; (b) FPGA module with integrated transceiver function

激光器输出脉冲宽度范围为 4~39 ns、峰值功率为 75 mW 的光信号。随后,光脉冲信号经过衰减器衰减和光功率计测试,得到的单光子级微弱光信号通过光纤耦合到 NFAD 中。由于工作在自由运行模式下 NFAD 的优异性能,对于 2 Mbit/s 信息传输速率,可实时响应输出电信号。最后,Rx 对 NFAD 输出的电信号进行采样并完成对 4PPM 信号的符号同步和解码,并发送解码后数据到 PC 进行实时误码率计算,得到系统的误码率等性能。

在实验过程中,通过上位机控制 NFAD,设定状态为工作温度 $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作电压 $V=64.2\text{ V}$,死时间 $t=150\text{ ns}$;接着通过上位机控制 FPGA 发送速率为 1 Mbit/s 的“1000”的 4PPM 人工编码对激光器进行调制,发送高电平 1 时打开激光器,发送低电平 0 时关闭激光器,从而让激光器输出信号波形;随后对激光器信

号使用一个光衰减器进行衰减,并将经过衰减之后的信号光接入光功率计进行测试,得到强度为 -60 dBm 的入射光;然后,将该入射光接口从光功率计上转移到 NFAD 上进行测试,测试结果再输出到 FPGA 进行解码处理,最后得到的解码信号与 FPGA 发出的编码信号共同接入示波器,进行信号观察,示波器显示如图 6(a) 所示,在每一个调制信号高电平 1 之后都跟随着一个光信号,实现了信号的同步,该通信系统能够使 4PPM 方案正常工作;随后,变更编码方式为 1 Mbit/s 的 PRBS 的 4PPM 随机编码进行误码率测试,NFAD 工作条件不变,入射光功率衰减到 -69.6 dBm ,如 6(b) 所示,观察到光信号相比同步信号存在一定的信号丢失,也就是存在一定的误码产生;最后,将该信号接入上位机进行误码率计算,得到 1.1×10^{-5} 误码率。

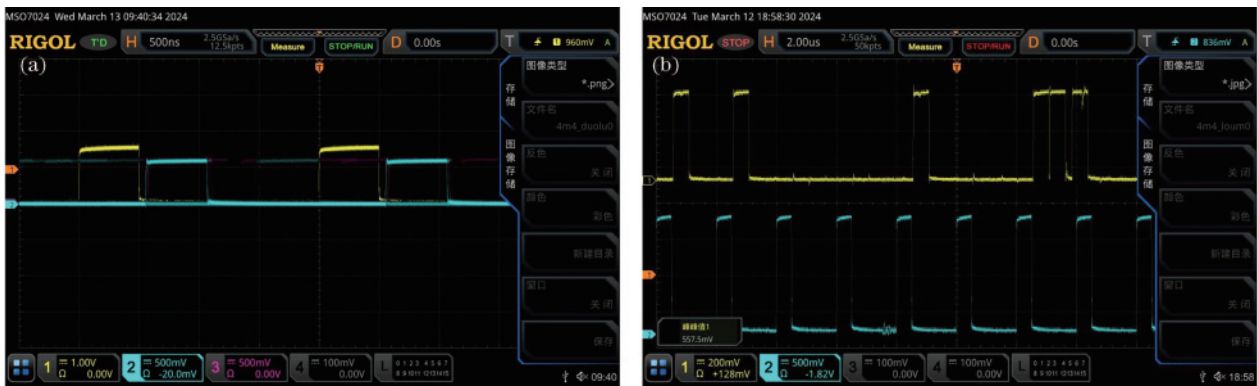


图 6 NFAD 误码率测试。(a) 发送 1000 人工码得到的误码率测试结果;(b) 误码率测试结果

Fig. 6 Bit error rate (BER) test of NFAD. (a) BER test results obtained by sending 1000 manual codes; (b) BER test results

对以上现象进行分析,不难得出,误码产生的根本原因是 SPAD 的雪崩事件属于概率事件,有两种可能都会造成误码,一是由于光子到达时刻未发生雪崩效应,应有的光计数没有产生,二是由于在没有光子到达时发生了雪崩效应,产生了不该有的光计数,前者对应于单光子探测器的探测效率不够高,而后者则对应单光子探测器的暗计数与后脉冲 P_{ap} 过大。而根据第 3 节的分析可知,单光子探测器的这几个指标主要与工作温度 T 、工作电压 V 、死时间 t 及输入光功率 P_{in} 密切相关。通过对上述参数进行优化调整,最终在工作温度 $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、工作电压 $V=64.2\text{ V}$ 、死时间 $t=150\text{ ns}$ 、输入光功率 $P_{in}=-69.6\text{ dBm}$ 的条件下实现了 1.1×10^{-5} 误码率,验证了所提自由运行模式下的单光子探测器应用于空间激光通信中的可行性,为后续阵列型高速单光子探测器的研究打下了坚实的基础。

5 结 论

从设计、制作和测试等方面较全面地描述了所优化的 InGaAs/InP SPD。主要内容包括:1)在器件结构中加入具有高反射率的介质-金属反射层,并优化双 Zn 扩散工艺,调整阶梯 PN 结深结宽,实现了增强 SPD

对入射光的吸收,提高器件量子效率及在 SPD 有源区中心形成均匀电场抑制边缘击穿,从而减小暗电流、暗计数率及后脉冲概率;2)对于单光子性能测试,采用了在 1.25 GHz 高频正弦门控驱动 SPAD,当温度为 225 K、过偏压为 6 V 时,实现的探测效率为 30%、暗计数率为 3 kHz、后脉冲概率为 2.4%。将高性能 SPAD 制备的单个 NFAD 首次应用在实时化空间激光通信系统中,测试了单个自由运行 NFAD 的参数性能,在 1 Mbit/s 传输速率下实现了 1.1×10^{-5} 误码率和约 -69.6 dBm 灵敏度。结果表明,在需要近红外异步单光子探测和实时空间激光通信的实际应用中,这种 NFAD 可以大大提高系统性能。

参 考 文 献

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [2] Fisher E, Underwood I, Henderson R. A reconfigurable single-photon-counting integrating receiver for optical communications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2013, 48(7): 1638-1650.

- [3] Chitnis D, Collins S. A SPAD-based photon detecting system for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 2028-2034.
- [4] Sun X L, Skillman D R, Hoffman E D, et al. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1865-1871.
- [5] 张艺斌, 邓汝杰, 刘河山, 等. 太极计划星间激光通信参数设计及实验验证[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2306002.
Zhang Y B, Deng R J, Liu H S, et al. Parameter design and experimental verification of taiji program inter-satellite laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2306002.
- [6] Cesarone R J, Abraham D S, Shambayati S, et al. Deep-space optical communications[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 410-423.
- [7] 教学渊, 杨奇, 戴潇潇, 等. 实时化自由空间光通信技术研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(12): 1206004.
Ao X Y, Yang Q, Dai X X, et al. Real-time free-space optical communication technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(12): 1206004.
- [8] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8971: 89710S.
- [9] Edwards B L, Israel D J, Vithlani S K. Latest changes to NASA's laser communications relay demonstration project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10524: 105240P.
- [10] Biswas A, Srinivasan M, Piazzolla S, et al. Deep space optical communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10524: 105240U.
- [11] Sodnik Z, Heese C, Arapoglou P D, et al. European deep-space optical communications program[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10524: 105240Q.
- [12] Zhou X Y, Zhai L, Liu J. Epitaxial quantum dots: a semiconductor launchpad for photonic quantum technologies[J]. *Photonics Insights*, 2022, 1(2): R07.
- [13] Guo K P, Tang Z, Chou X X, et al. Printable organic light-emitting diodes for next-generation visible light communications: a review[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(4): 044001.
- [14] 张娟, 姚儿, 柯少颖. 无电荷层 InGaAs/Si 雪崩光电探测器的优化设计[J]. *光学学报*, 2024, 44(5): 0504001.
Zhang J, Yao E, Ke S Y, et al. Optimal design of charge-free layer InGaAs/Si avalanche photodetector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(5): 0504001.
- [15] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 696-705.
- [16] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 43-47.
- [17] 崔大健, 敖天宏, 奚水清, 等. InGaAs 单光子雪崩焦平面研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(3): 20230016.
Cui D J, Ao T H, Xi S Q, et al. Research progress of InGaAs single-photon avalanche focal plane(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20230016.
- [18] Zimmermann H, Steindl B, Hofbauer M, et al. Integrated fiber optical receiver reducing the gap to the quantum limit[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2652.
- [19] Steindl B, Hofbauer M, Schneider-Hornstein K, et al. Single-photon avalanche photodiode based fiber optic receiver for up to 200 Mb/s[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 3801308.
- [20] Zhang L, Chitnis D, Chun H, et al. A comparison of APD- and SPAD-based receivers for visible light communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2435-2442.
- [21] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [22] Robinson B S, Kerman A J, Daule E A, et al. 781 Mbit/s photon-counting optical communications using a superconducting nanowire detector[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(4): 444-446.
- [23] Acerbi F, Anti M, Tosi A, et al. Design criteria for InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6800209.
- [24] Fang Y Q, Chen W, Ao T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550 nm [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 083102.
- [25] Signorelli F, Telesca F, Conca E, et al. Low-noise InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for fiber-based and free-space applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(2): 3801310.
- [26] 王玲, 刘博, 李志康, 等. 基于单像素单光子探测的目标识别与跟踪方法[J]. *半导体光电*, 2023, 44(2): 272-276.
Wang L, Liu B, Li Z K, et al. Target recognition and tracking method based on single pixel single photon detection[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2023, 44(2): 272-276.
- [27] Hopman P I, Boettcher P W, Candell L M, et al. An end-to-end demonstration of a receiver array based free-space photon counting communications link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6304: 63040H.
- [28] Wang C, Wang J Y, Xu Z Y, et al. Afterpulsing effects in SPAD-based photon-counting communication system [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 202-210.
- [29] Tian Y, Li Q, Ding W Q, et al. High speed and high sensitivity InGaAs/InAlAs single photon avalanche diodes for photon counting communication[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5245-5253.
- [30] Jiang W H, Gao X J, Fang Y Q, et al. Miniaturized high-frequency sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(12): 123104.

- [31] Ma J, Bai B, Wang L J, et al. Design considerations of high-performance InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for quantum key distribution[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7497-7502.
- [32] Telesca F, Signorelli F, Tosi A. Double zinc diffusion optimization for charge persistence reduction in InGaAs/InP SPADs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2024, 30(1): 3801207.
- [33] Donnelly J P, Duerr E K, McIntosh K A, et al. Design considerations for 1.06- μm InGaAsP-InP geiger-mode avalanche photodiodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(8): 797-809.
- [34] Mehdi A B, Lou X P, Dong M L, et al. InGaAs/InP single-photon avalanche diodes performance variation with charge layer width and doping[C]//2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), October 20-22, 2017, Yangzhou, China. New York: IEEE Press, 2017: 286-290.
- [35] 敖天宏, 赵江林, 童启夏, 等. In_{0.53}Ga_{0.47}As 雪崩光电二极管单光子探测器的温度特性研究[J]. *半导体光电*, 2022, 43(4): 765-769.
- Ao T H, Zhao J L, Tong Q X, et al. A study of temperature characteristics in In_{0.53}Ga_{0.47}As single photon avalanche diodes detector[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(4): 765-769.
- [36] Calandri N, Sanzaro M, Tosi A, et al. Charge persistence in InGaAs/InP single-photon avalanche diodes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(3): 4500107.
- [37] Lee Y S, Chen K Y, Chien S Y, et al. Characteristics of charge persistence in InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(22): 1980-1982.
- [38] Xu Q, Yu C, Chen W, et al. Compact free-running InGaAs/InP single-photon detector with 40% detection efficiency and 2.3 kcps dark count rate[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2024, 30(1): 6400107.