

InP 基自由运行模式单光子 APD

史衍丽^{1,2}, 朱泓遐^{1,2}, 杨雪艳^{1,2}, 曾辉^{1,2}, 李再波^{1,2}, 刘辰^{1,2}, 王建^{1,2}, 王伟^{1,2}

(1. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650091;

2. 云南大学 云南省量子信息重点实验室, 云南 昆明 650091)

摘要: 基于 InGaAs/InP 材料的雪崩二极管探测器工作响应波段范围 0.9~1.67 μm , 在盖革模式下探测效率较高, 具有单光子量级的灵敏度, 通过配置不同的偏置电路, 可工作在门控和自由运行模式。目前主要采用门控模式的工作方式, 门控模式可应用于光子到来时间已知的量子密钥分发。在激光测距、激光雷达成像等应用中当光子到达时间是未知的条件下, 器件需工作在自由运行模式下。通过内部集成或片上集成自淬灭器件, 探测器本身具有自淬灭或自恢复功能, 无需外部淬灭电路, 可工作在自由运行模式, 大大拓展了 InGaAs/InP 单光子探测器的应用领域, 同时对制备单光子探测器阵列具有优势。另外, 采用 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格材料作为雪崩二极管的吸收层, 可将探测器的截止波长进一步扩展为 2.4 μm 。首先对盖革模式 APD 进行了介绍, 在此基础上对当前发展的自由运行模式以及扩展波长的 InP 基单光子探测器原理和性能进行了详细的阐述。

关键词: InP 基; 雪崩光电二极管; 单光子探测器; 盖革模式; 自由运行模式; 自淬灭; 负反馈
中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0103005

InP-based free running mode single photon avalanche photodiode

Shi Yanli^{1,2}, Zhu Hongxia^{1,2}, Yang Xueyan^{1,2}, Zeng Hui^{1,2}, Li Zaibo^{1,2}, Liu Chen^{1,2},
Wang Jian^{1,2}, Wang Wei^{1,2}

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Key Lab of Quantum Information of Yunnan Province, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: The avalanche photodiode detector based on InGaAs/InP has a working response band range of 0.9–1.67 μm , which has high detection efficiency and single photonic sensitivity in Geiger mode. By configuring different bias circuits, it can work in gating and free running mode. At present, the gating mode is mainly used, and can be applied to quantum key distribution with known arrival time of photons. In laser ranging, lidar imaging and other applications, when the arrival time of photons is unknown, the device needs to work in free running mode. Through internal integration or on-chip integration of self-quenching devices, the detector itself has the function of self-quenching or self-recovery, does not need external quenching circuit, and can work in free running mode. This greatly expands the application field of InGaAs/InP single-photon detector, and has the advantage of fabricating single-photon detector array at the same time. In addition, the cutoff wavelength of the detector can be further extended to 2.4 μm .

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 云南省重点基金(2015FA040); 云南省重大科技项目(2018ZJ002)

作者简介: 史衍丽(1969-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体光电器件物理与器件方面的研究。Email: ylshikm@hotmail.com

by using InGaAs/GaAsSb II superlattice material as the absorption layer of the avalanche photodiode. In this paper, the Geiger mode APD was introduced, and the principle and performance of the current free running mode and the extended wavelength InP based single photonic detector were described in detail.

Key words: InP-based; avalanche photodiode; single photon detector; Geiger mode; free running mode; self-quench; negative feedback

0 引言

1985年,AT&T Bell实验室首次用 InGaAs/InP 雪崩二极管(APD)实现了单光子探测^[1],随后 APD 探测器引起了人们的广泛关注。由于 InGaAs/InP APD 单光子探测器具有体积小、性能高、成本低、高温工作等众多优点,使其成为近红外单光子探测的最佳选择^[2]。国际上美国 Princeton Lightwave 公司、意大利米兰理工大学和东芝欧洲研究所等,国内重庆光电技术研究所、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学技术大学等机构都对 APD 单光子探测器进行了深入的研究,取得了丰硕的成果,并广泛应用于量子保密通讯^[3-4]、激光测距^[5]、微弱信号检测等领域。

InGaAs/InP 雪崩二极管(APD)探测器具有两种工作模式:线性模式和盖格模式,盖格模式下器件工作在击穿电压以上,具有高达 $10^5 \sim 10^6$ 的增益,具有单光子探测的灵敏度,但存在自维持的雪崩放大,需要外部淬灭电路及时把工作电压调整到击穿电压以下,停止雪崩,否则器件不断放大的雪崩电流导致器件热烧毁。目前盖革模式雪崩二极管探测器主要采用门控模式的外部淬灭电路,器件只在门脉冲即“Gate on”的期间开始雪崩,去掉门脉冲时器件停止雪崩。通过控制门脉冲的参数,可获得高探测效率、低暗计数率、低后脉冲效应,但是器件只能工作在光子到达时间已知的条件下。在激光测距^[5]、时间相关计数^[6]、激光雷达^[7]成像等应用中,当光子到达时间是未知时,器件需工作在自由运行模式下,即器件需保持在连续工作的状态下,才能有效地探测。

2007年,Kai Zhao 和 Arthur Zhang 等人提出一种具有内置自淬灭和自恢复的单光子探测器(Single Photon Avalanche Diode,SPAD)^[8]。这种器件无需外部淬灭电路,通过引入内部势垒快速淬灭雪崩。2009年,

Mark A. Itzler 和 Xudong Jiang 等人提出了负反馈雪崩二极管(NFADs)^[9],在 SPAD 上集成一个薄膜电阻引入负反馈,可确保快速自淬灭,并具有非常低的寄生效应。具有自淬灭功能的 SPAD 器件无需外部淬灭电路,简化了 SPAD 器件的工作方式及外部信号处理电路,在阵列应用上也具有明显的优势。另外,为了扩展 InGaAs 材料的吸收波长,采用 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格材料作为雪崩二极管的吸收层,能够实现更宽波长范围的探测。文中首先对盖革模式的 APD 探测器进行了介绍,在此基础上介绍了自由运行模式以及扩展波长的 InP 基单光子探测器,并对其原理和性能进行了详细的阐述。

1 盖格模式 InGaAs/InP SPAD

1.1 器件结构和工作原理

InGaAs/InP SPAD 采用分离吸收倍增结构,主要的层结构包括吸收层、缓变层、电荷层和倍增层。吸收层一般采用窄带隙的材料,电子很容易从价带被激发到导带。倍增层则采用宽带隙的材料,避免或减小隧穿电流。缓变层通过组分的递变,避免大的晶格失配引入缺陷,同时减小势垒突变高度,使电场变得平滑,减少载流子在异质结处的积聚。为能有好的器件性能,一般要求吸收区的电场足够小,倍增层的电场足够大,而电荷层可以调制器件的电场,实现吸收层低电场,在保证光生载流子能输运到倍增层的前提下抑制由隧穿效应产生暗载流子,倍增层的电场要足够大以维持雪崩电离,产生雪崩倍增。器件工作原理如图 1 所示。当光子入射到吸收层,产生光生电子空穴对,在内部电场的作用下空穴或电子会到达倍增层。当 SPAD 两端的偏压略高于击穿电压时,光生载流子在高电场的作用($10^5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 量级)下与晶格发生碰撞,产生新的电子空穴对,新产生的电子空

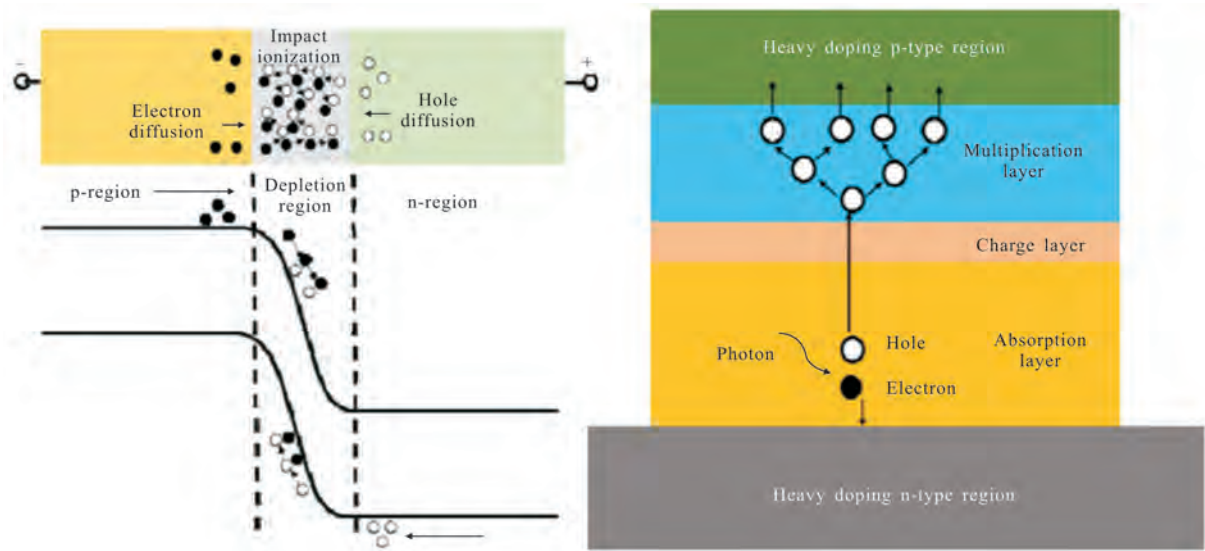


图 1 雪崩探测器原理和层结构^[10]

Fig.1 Principle and layer structure of avalanche detector^[10]

穴对又会与晶格发生碰撞,往而复之,实现信号的雪崩式放大,并形成雪崩计数信号。

APD 器件的雪崩过程一旦被触发,便不会停止,需要在探测到雪崩信号后立即将器件上的偏压降低到击穿电压以下,称之为淬灭。目前淬灭电路(如图 2 所示)主要有三种:主动淬灭,被动淬灭,门控淬灭。被动淬灭是将 APD 与一个大的抑制电阻串联,电路简单。当 SPAD 发生雪崩时,雪崩电流通过抑制电阻分压,使 APD 两端的电压降低产生淬灭。一般选择

百 kΩ 量级的电阻可以使雪崩快淬灭,但器件整个恢复时间在百 ns 量级,导致重复计数率低。主动抑制是当外部电路检测到雪崩信号时将 SPAD 两端的驱动电压迅速降低到击穿电压之下,实现雪崩淬灭,具有恢复时间短,计数重复率高的优点,但电路设计复杂。门控脉冲淬灭电路下器件只在在光子到来的短时间内处于盖革模式。由于器件处于高电场情况下的时间较短,大大减少了暗载流子产生的噪声信号,降低了暗计数率,还很好地抑制了后脉冲效应。

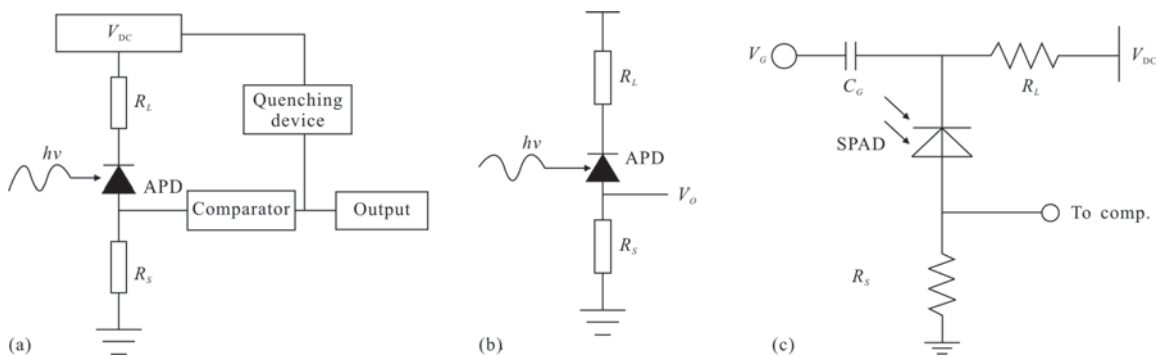


图 2 (a)主动淬灭,(b)被动淬灭,(c)门控淬灭

Fig.2 (a) Active quenching, (b) passive quenching, (c) gated quenching

对于光子到达时间未知的量子密钥分发,门控淬灭电路是最好的选择。当在光子到来时间未知时,需要 SPAD 一直处在工作状态,这与门控淬灭电路不兼

容。必须选择主动淬灭主动恢复、被动淬灭被动恢复,被动淬灭主动恢复电路等淬灭电路进行探测,但需要通过复杂电路的设计来克服后脉冲概率大的问题。

1.2 性能表征

探测效率(PDE)、暗计数率(DCR)和后脉冲概率都是表征单光子探测器性能的重要参数，器件的材料、结构设计、外加偏压和电路设计都会影响其性能。探测效率是入射一个光子后输出雪崩信号的概率。它由吸收效率、耦合效率还有雪崩碰撞产生概率决定。暗计数率定义为无光照(暗)情况下单位时间内产生的雪崩信号的次数^[2]。产生机制包括暗载流子的热激发、隧穿效应和后脉冲概率。高温下主要受暗载流子热激发的影响，低温和高电场情况下主要考虑隧穿效应；由于倍增层材料本身的缺陷，器件存在着严重的后脉冲效应。后脉冲效应是在入射光子引发一次雪崩后，产生的雪崩载流子部分被倍增层的深能级缺陷所俘获，之后被慢慢释放，并在高电场的作用下，发生二次雪崩的现象，造成误计数。后脉冲概率可通过减小雪崩电荷数目，减少倍增层缺陷以及对雪崩载流子的俘获，或延长器件的恢复时间来使俘获的载流子逃逸，但恢复时间的增加会影响器件的重复频率。

随着探测器材料生长质量和器件设计水平的提高，目前 InGaAs/InP SPAD 探测效率高达 55%，暗计数率为几 kHz，重复频率高达 GHz，成为通讯波段的主要探测器^[11-15]。国内外包括美国 Prirnceton Lightwave 公司、瑞士 IDQ 公司、意大利米兰理工大学、韩国 Wooriro、中国电子科技集团公司第四十四研究所等都

能提供货架市售产品。图 3 给出了 Prirnceton Lightwave 公司生产的 SPAD 器件性能^[16]，其光敏面直径 25 μm，1 M 的门控重复频率，测试温度为 235 K，PDE 为 30%时 DCR 小于 20 kHz，后脉冲概率为 1E-3/门。

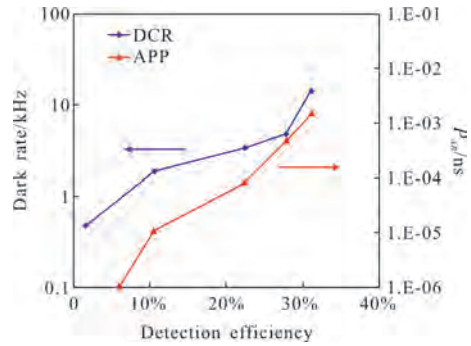


图 3 Prirnceton Lightwave 公司生产的 SPAD 器件性能^[16]
Fig.3 Performance of SPAD devices produced by Prirnceton Lightwave Company^[16]

2 具有内部自淬灭和自恢复机制的 SPAD

2.1 器件结构和工作原理

美国加州大学的 Kai Zhao 等人^[8]提出了可应用于自由运行模式的自淬灭自恢复探测器，无需外部的淬灭电路，大大地简化了单光子探测驱动电路，使制作实际可应用的阵列探测器成为可能。该器件的层结构(如图 4(a)所示)除了具有与上述 SPAD 相同的吸收层、缓变层、电荷层、倍增层之外，还增加了瞬

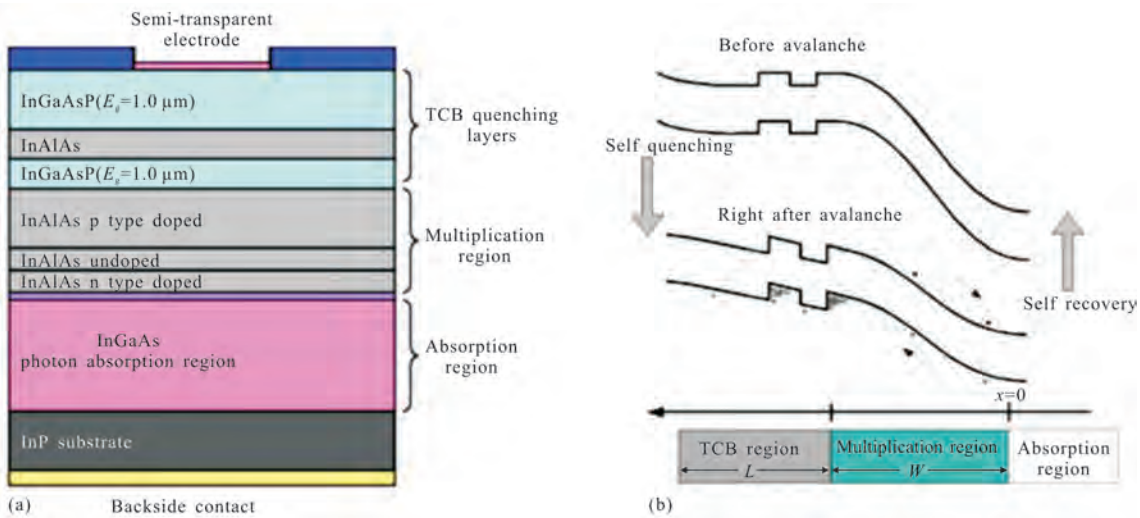


图 4 自淬灭和自恢复探测器结构(a)^[17]和探测器工作原理(b)^[18]

Fig.4 Self-quenching and self-recovery detector structure (a)^[17] and detector working principle (b)^[18]

态载流子缓冲区^[19](Transient Carrier Buffer, TCB), 也称之为淬灭层。淬灭层利用异质结结构的能带势垒来调制器件中的载流子输运, 这个势垒可以位于雪崩区 p-i-n 的 p 层上(从衬底向上的方向为上), 在价带上形成势垒阻挡空穴, 也可以在 n 层下通过导带上的势垒积聚电子, 如图 4(b)所示^[18]。当光生载流子在倍增层发生碰撞电离后产生的大量电子、空穴, 在外加电场作用下电子被阳极收集, 而空穴向阴极运动时被淬灭层与倍增层之间的势垒阻挡, 在界面处积聚, 形成场屏蔽效应, 使倍增层电场减小到不足以发生碰撞电离, 雪崩停止。积聚在势垒处的载流子通过热激发或隧穿逃逸后, 器件再次进入雪崩状态, 称之为器件的自恢复。TCB 势垒高度和厚度的设计与生长精度控制, 是决定器件性能的一个重要因素。

2.2 器件特性

自淬灭自反馈 SPAD 的 PDE 比传统门控 SPAD 要低, 暗计数率高。但存在增益稳定, 过剩噪声小的优势。目前报道的器件在温度为 160 K 时, PDE 为 12%, DCR 为 3.3 M/s, 自恢复时间为 60 ns^[18]。图 5 给出了自淬灭自恢复 SPAD 器件增益随偏压的测试结果^[8], 以及在光、暗条件下器件的雪崩信号。从图可见, 光照情况下, 在偏压 30 V 左右开始出现雪崩脉冲, 随着偏压的增加, 倍增层电场增大, 雪崩脉冲迅速增加。器件处于 30~30.9 V 期间时增益稳定在 10⁶ 左右, 体现了稳定的增益特性。而门控模式 SPAD 器件在偏压高于击穿电压时, 增益很高, 但偏压变化几 mV 就会导致增益有大幅度的波动, 导致大的过量噪声。

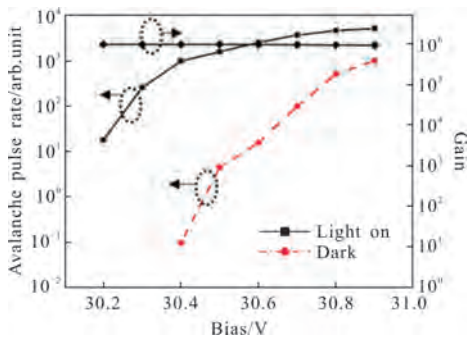


图 5 雪崩脉冲率在暗情况和 1 550 nm 的光照下随偏置电压 (30.2~31.0 V) 的变化, 其中增益变化很小^[8]

Fig.5 Avalanche pulse rate varies with the bias voltage(30.2~31.0 V) under dark condition and 1 550 nm light, in which the gain changes little^[8]

自淬灭自反馈 SPAD 器件具有较快的淬灭时间, James Cheng^[18]等人研究了器件工作偏置电压大于击穿电压时一个空穴到达倍增层触发雪崩后的电流响应, 如图 6 所示, 由此可以看出载流子在势垒处积聚后, 雪崩在大约 0.1 ns 极短时间内就可以迅速淬灭。但势垒处积聚的载流子逃逸后产生了一个持续电流, 使器件的恢复时间变长。恢复时间受 TCB 势垒的高度和厚度, 以及势垒处集聚载流子的热激发和隧穿效应等因素决定, 一般为 10~100 ns。在器件结构确定的条件下, 工作温度越高、外加电场越大, 恢复时间、淬灭时间越短^[20]。

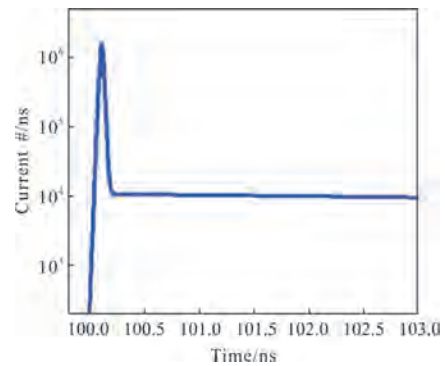


图 6 器件的电流响应^[18]

Fig.6 Current response of devices^[18]

3 负反馈雪崩二极管

3.1 NFAD 器件结构与工作原理

2009 年, Princeton Lightwave 公司提出了一种基于 InGaAs/InP SPAD 的负反馈雪崩二极管(NFAD)^[9], 也不需要外部淬灭电路, 但与前面自淬灭和自恢复的 SPAD 不同, 它通过在 SPAD 上集成一个薄膜电阻片来引入负反馈, 其器件结构示意图如图 7(a)所示, 图 7(b)是顶部集成电阻的俯视图。图 7(c)给出了器件工作的等效电路图。在图 7(c)中, 蓝色部分为 SPAD, 红色是集成薄膜电阻, 开关表示器件的工作状态。当开关闭合时, 器件处于雪崩状态, 电容器 Cd 放电, 产生的雪崩电流通过负反馈电阻分压, 使器件两端电压迅速降低到击穿电压以下, 产生淬灭。当开关打开时, NFAD 通过 RL 充电恢复探测状态, 恢复时间为 RL 和 Cd 乘积^[21]。

与传统被动淬灭相比, 片上集成大的负反馈电阻可以快速的淬灭雪崩, 具有更小的寄生电容, 能将

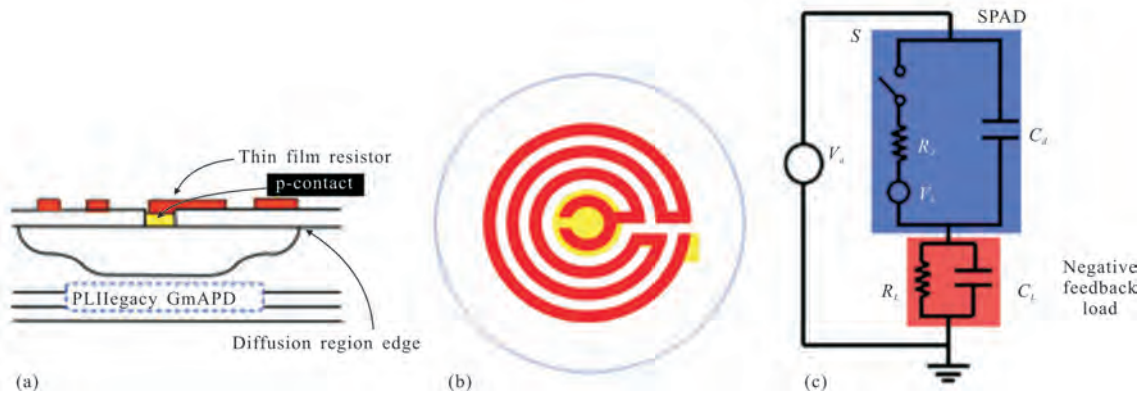


图 7 NFAD 顶部集成电阻(a)、(b)和 NFAD 工作等效电路图(c)^[21]

Fig.7 NFAD top integrated resistance (a), (b) and NFAD working equivalent circuit diagram (c)^[21]

雪崩产生的电荷数目降低到 10^5 量级，减小后脉冲效应。而外部产生的被动淬灭电路，SPAD 串联一个大的电阻会引起显著的寄生电容，造成倍增层的雪崩电荷数增多(约 $10^7 \sim 10^8$)，后脉冲效应也会随之增加^[21]。

3.2 器件性能

Princeton Lightwave 公司已经实现了 NFAD 器件的产品化，性能参数 PDE 和 DCR 由其负反馈电阻和 SPAD 本身的性能决定。在温度为 240 K 温度，工作波段为 1550 nm 时，器件的 PDE 可达到 10%~15%，10% PDE 时暗计数率为 20~60 KHz，通过对 NFAD 进一步冷却可以获得更低的暗计数率^[22]。

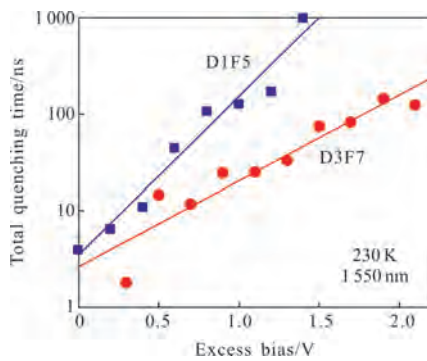


图 8 230 K 的温度下 NFAD 器件淬灭时间随过偏压的变化^[9]

Fig.8 Variation of quenching time of NFAD devices with overbias at 230 K temperature^[9]

NFAD 器件的淬灭时间和恢复取决于负载电阻和过偏压大小，负载电阻越大，需要的淬灭时间越短。淬灭时间随过偏压呈指数增长，图 8 给出了淬灭时间随过偏压的变化情况，在 230 K 的工作温度下，

在 2 V 的过偏压条件下，淬灭时间在 100 ns 以内，在温度 235 K 和 1.4 V 的过偏压下恢复时间为 55 ns^[9]。

4 扩展波长的 InGaAs 雪崩二极管

InGaAs/InP SPAD 的吸收层材料为 InGaAs，禁带宽度为 0.75 eV，对应截止波长 1.67 μm ，它确定了器件工作的波段范围。随着激光波长的延长、红外夜视成像等应用需求，提出了拓展 InGaAs/InP SPAD 红外探测器截止波长的发展需求^[23]。InGaAs/GaAsSb II 类超晶格是备受关注的新型中短波红外材料，将 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格作为单光子探测器的吸收层的材料，可扩展响应波段到 2.4 μm ，另外，通过材料能带工程设计，理论上将获得 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格与 InP 衬底层更好地完成晶格匹配，因此可以减小器件缺陷密度，长出更高质量的材料^[24]。这为研制宽响应波段的 III-V 族单光子探测器提供了新的思路。Bora M. Onat, Krys Slomkowski 等人采用厚度为 1 μm 、重复周期为 100 的 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格材料，盖革模式下实现了单光子探测，过量偏压为 2 V 时，DCR 为 1 MHz^[25]。

5 单光子探测器阵列的发展

自淬灭自恢复 SPAD 和 NFAD 器件，不需要外部淬灭电路，其工作方式与目前的 PIN InGaAs 短波红外焦平面探测器相似，当 NFAD 两端的直流偏压高于器件击穿电压时就会发生雪崩，大大减小了阵列集成工艺的复杂性，而且在一定的工作偏置范围

内,具有稳定的雪崩增益和较低的过剩噪声,对制备阵列结构具有很大优势。目前 Princeton Lightwave 公司基于 NFAD 器件已经实现了小阵列单光子阵列的生产,图 9 给出 NFAD 单个像素与 NFAD 的阵列结

构^[10],其中图 9(a)为 NFAD 单管,图 9(b)为四个像素,图 9(c)为 2×8 个像素,图 9(d)为 4×16 个像素,其阵列制备工艺与常规焦平面探测器工艺兼容,制备的 NFAD 阵列可用于光子数分辨、三维微弱信号成像等。

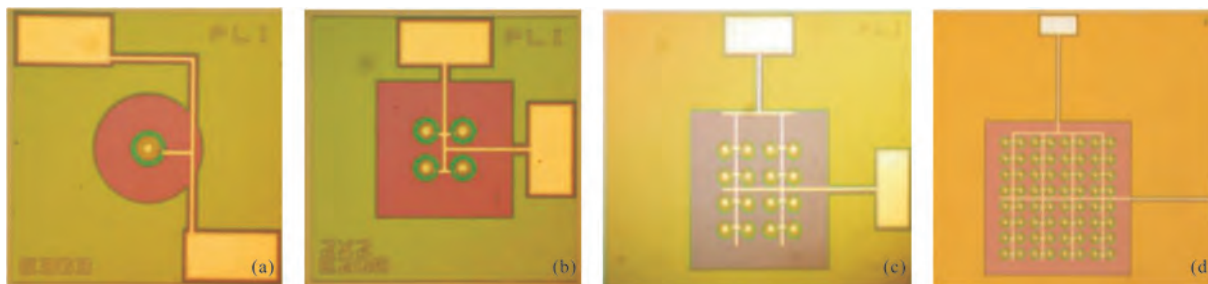


图 9 离散 NFAD(a)NFAD 阵列(b)、(c)、(d)^[21]

Fig.9 Discrete NFAD (a) NFAD array (b), (c), (d)^[21]

6 发展趋势

自淬灭、负反馈单光子探测器自身具有淬灭功能,改变了门控需要外部淬灭电路的工作方式,能够工作在自由运行模式,具有更广泛的应用领域;由于工作方式的改变,容易集成为单光子探测器阵列,具有广阔的发展前景。目前的负反馈单光子探测器还存在探测效率低、暗计数率高的问题,进一步的发展趋势主要是提高单个管子的性能,在此基础上发展高性能单光子焦平面阵列。具体包括:(1) 提高倍增层材料质量,降低后脉冲效应、暗计数率;(2) 发展新的器件结构设计,提高探测效率;(3) 利用二维材料的能带工程,提高材料晶格匹配,扩展器件响应波长;(4) 发展单光子焦平面探测器。

7 结论

文中详细介绍了基于 InGaAs/InP 的单光子探测器。常规门控模式 InGaAs/InP SPAD 探测效率最高,但需要淬灭电路降低暗计数、抑制后脉冲效应,在阵列结构中集成困难,过剩噪声高。自淬灭自恢复雪崩二极管和 NFAD 可用于自由运行模式,探测效率比门控模式 SPAD 低,但它们不需要外部淬灭电路,易于集成单光子探测阵列,过剩噪声低。将 InGaAs/GaAsSb II 类超晶格材料作为基于 InGaAs/InP 雪崩二极管吸收层的材料,可以有效增大探测器的截止波长,拓宽其应用范围。目前发展的自由运行模式单

光子探测器还存在探测效率偏低、暗计数率高的问题,进一步的发展重点将是提高探测效率、降低暗计数率,在单管性能提升的基础上尽快发展单光子焦平面阵列,实现高性能、高速三维成像。

参考文献:

- [1] Levine B F, Bethea C G, Campbell J C. Room-temperature 1.3- μm optical time domain reflectometer using a photon counting InGaAs/InP avalanche detector [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 46(4): 333-335.
- [2] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(5): e286
- [3] Stucki D, Ribordy GréGoire, Stefanov André, et al. Photon counting for quantum key distribution with peltier cooled InGaAs/InP APDs [J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, 48 (13): 1967-1981.
- [4] Hänggi E, Renner R, Wolf S. Quantum cryptography based solely on Bell's theorem [J]. *Physics*, 2009: arxiv:quant-ph/0911.4171.
- [5] Ren M, Gu X, Liang Y, et al. Laser ranging at 1 550 nm with 1 GHz sine-wave gated InGaAs/InP APD single-photon detector[J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13497-502.
- [6] Kapusta P, Wahl M, Erdmann R. Advanced Photon Counting: Applications, Methods, Instrumentation[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [7] Pawlikowska A M, Halimi A, Lamb R A, et al. Single-photon three-dimensional imaging at up to 10 kilometers

- range[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11919.
- [8] Zhao K, Zhang A, Lo Y H, et al. InGaAs single photon avalanche detector with ultralow excess noise [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(8): 081107
- [9] Itzler M A, Jiang X, Nyman B, et al. InP-based negative feedback avalanche diodes [C]//Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering, 2009, 7222(1): 54–68.
- [10] Hu Weida, Li Qing, Wen Jie, et al. InGaAs/InP research status and progress of infrared avalanche photodetector [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(3): 201–208. (in Chinese)
- [11] Jiang W H, Gao X J, Fang Y Q, et al. Miniaturized high-frequency sine wave gating InGaAs/InP single-photon detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(12): 123104.
- [12] Liu M, Bai X, Hu C, et al. Low dark count rate and high single-photon detection efficiency avalanche photodiode in geiger-mode operation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(6): 378–380.
- [13] Liang Y, Fei Q, Liu Z, et al. Low-noise InGaAs/InP single-photon detector with widely tunable repetition rates [J]. *Photonics Research*, 2019(3): DOI: 10.1364/prj.7.0000a1.
- [14] Liang Y, Chen Y, Huang Z, et al. Room-temperature single-photon detection with 1.5-GHz Gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 29(1): 142–145.
- [15] Comandar L C, Bernd Fröhlich, Dynes J F, et al. GHz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1 550 nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 117(8): 045005.
- [16] Princeton Lightwave. PGA series single photon counting avalanche [EB/OL]. Photodiodes. <https://www.docin.com/p-1858751631.html>, 2017–3–3/2019–10–13.
- [17] Kai Z. III–V single photon avalanche detector with built-in negative feedback for NIR photon detection [D]. San Diego: University of California, 2008.
- [18] Cheng, J. Self-quenched InGaAs single-photon detector[C]// Proceedings of SPIE, 2009, 7320: 732010.
- [19] Zhao K, Zhang A, Farr W, et al. Ultra low noise InGaAs single photon detector with transient carrier buffer [C]// LEOS 2007–IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, 2007: 447–448.
- [20] You S, Cheng J, Lo Y H. Physics of single photon avalanche detectors with built-in self-quenching and self-recovering capabilities [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(7): 960–967.
- [21] Jiang X, Itzler M A, O’Donnell, Kevin, et al. Shortwave infrared negative feedback avalanche diodes and solid-state photomultipliers [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (8): 081908.
- [22] Jiang Xudong, Mark A Itzler, Kevin O’Donnell, et al. InGaAs/InP negative-feedback avalanche diodes (NFADs) and solid state photomultipliers (SSPMs) [C]//Proc SPIE, Advanced Photon Counting Techniques VI, 2012, 8375: 83750U.
- [23] Bin Yang. Investigation and application of type II superlattice infrared optoelectronic materials[J]. *China Basic Science*, 2019, 21(1): 52–54, 64.
- [24] Chuan Jin, Jianxin Chen, Chengzhang Yu, et al. InGaAs/GaAsSb Class II superlattice shortwave infrared detection materials and device characteristics [C]//National Conference on Molecular Beam Epitaxial, 2015.
- [25] Onat B M, Slomkowski K, Itzler M. Extended wavelength InGaAs-Based avalanche photodiodes for single photon counting applications[C]//Photonics Conference. IEEE, 2012.