

## GaN 基雪崩光电二极管及其研究进展

刘福浩<sup>1,3</sup>, 许金通<sup>2,3</sup>, 王 玲<sup>2,3</sup>, 王荣阳<sup>1,3</sup>, 李向阳<sup>2,3</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 越来越多的民用与军事对高灵敏度紫外探测的需求促进了 GaN 基雪崩光电二极管(APD)的快速发展。雪崩光电二极管工作在高反偏电压状态, 器件内部载流子在高场下发生碰撞电离, 从而使探测信号产生增益。首先对 GaN 基雪崩光电二极管的研究进展进行了回顾, 然后重点报道了器件的增益最大可达  $3 \times 10^5$ , 介绍了本征层厚度与器件暗电流的关系, 简单介绍了正在组建的基于相敏探测的交流增益测试系统, 并研究了过剩噪声与调制频率之间的关系, 发现在低频波段(30~2 kHz), 过剩噪声呈现  $1/f$  噪声特性。最后, 对盖革模式的雪崩光电二极管的研究进展及应用前景进行了简单介绍。

**关键词:** 雪崩光电二极管; 增益; 暗电流; 噪声; 盖革模式

**中图分类号:** TN23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)04-1215-07

## GaN-based avalanche photodiodes and its recent development

Liu Fuhao<sup>1,3</sup>, Xu Jintong<sup>2,3</sup>, Wang Ling<sup>2,3</sup>, Wang Rongyang<sup>1,3</sup>, Li Xiangyang<sup>2,3</sup>

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The investigation of GaN-based avalanche photodiodes(APDs) was motivated by the demand of high sensitivity ultraviolet detectors in numerous civilian and military applications. APDs operate under high reverse bias voltage, and carriers in the device caused impact ionization under high electric fields, as a result, the avalanche multiplication could be obtained. In this paper, reviews were made on the development of GaN-based avalanche photodiodes, the largest value of gain in this work was nearly  $3 \times 10^5$ . Relationship between width of the intrinsic layer and dark current has been studied. The measuring system based on phase sensitive detecting technique has been shown. Relationships between modulating frequencies and noise has also been investigated. It was found that in the range of low frequency(30-2 kHz), the excess noise behaved as  $1/f$  noise. In the end, the recent developments and applications of the Geiger mode operations of GaN-based APDs are introduced.

**Key words:** avalanche photodiodes; gain; dark current; noise; Geiger mode

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60907048); 上海市自然科学基金(10ZR1434500)

作者简介: 刘福浩(1987-), 男, 博士生, 主要从事 GaN 基雪崩光电二极管方面的研究。Email: liufuhao@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 李向阳(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事半导体光电探测器方面的研究工作。Email: lixy@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

自从 20 世纪 90 年代开始, 由于蓝光 LED 与 LD 研究需求的驱动, GaN 基宽禁带半导体开始成为科学研究中的热点之一。同时, 由于 GaN 基材料的禁带宽度可调、高铝组份 AlGaIn 材料的本征日盲波段吸收和可以工作在苛刻环境下等特点, GaN 基紫外探测器也得到深入研究。紫外探测器在军事和民用等方面应用广泛。在军事上导弹预警、制导、紫外通讯、生化分析等方面都有紫外探测的需求。在民用上, 如明火探测、臭氧监测、生物医药分析、太阳照度检测、海上溢油监测、公安侦查等。总之, 紫外探测技术是继红外和激光技术之后的又一军民两用光电探测技术<sup>[1-3]</sup>。

目前, 在微弱紫外信号探测应用领域, 光电倍增管(PMT)仍占据主导地位。光电倍增管由于内部电子倍增产生增益(典型值为  $10^6$ ), 具有非常高的灵敏度; 选择合适的阴极材料和前端加载合适的滤波片, 可以实现纯日盲探测。然而, 光电倍增管也具有很多显著缺点, 比如体积庞大, 倍增管易碎, 工作在高反偏电压下(大于 1000 V)等。因此, 有必要研究一种高灵敏度的半导体探测器替代光电倍增管。GaN 基雪崩光电二极管在反偏电压下具有碰撞离化产生增益的特点, 可以替代光电倍增管实现紫外波段的高灵敏度探测。GaN 材料在 3 MV/cm 电场下即可具有明显的碰撞离化现象, 经过适当的材料结构设计, 可以使得器件工作电压小于 100 V<sup>[4-5]</sup>。

## 1 GaN 基雪崩光电二极管研究进展回顾

1998 年, A. Osinsky 等第一次报道了 GaN 探测器的雪崩倍增现象, 器件为 p- $\pi$ -n 结构, 器件在 42~43 V 反偏电压下发生明显雪崩倍增现象, 击穿电压呈现正的温度系数, 这也是雪崩倍增的明显特征<sup>[6]</sup>。1999 年, K. A. McIntosh 等报道了在蓝宝石衬底上采用了氢化物气相外延生长的 GaN 材料制备的 APD 器件, 在 320~360 nm 波段, 器件的均匀增益大于 10, 响应时间受测试系统的限制, 测试结果小于 5  $\mu$ s<sup>[7]</sup>。2000 年, J. C. Carrano 等报道了采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 方法生长的 GaN 材料制备的 APD 器件, 器件直径为 24  $\mu$ m, 最大增益大于 25, 发

生雪崩倍增时的临界场强大于 3 MV/cm, 高偏压下器件没有发现明显的微等离子体击穿现象<sup>[8]</sup>。2000 年, B. Yang 等报道了低暗电流的 GaN 基 APD 器件, 击穿电压温度系数为 0.03 V/K<sup>[9]</sup>。

2005 年, R. McClintock 等报道了 AlGaIn 基 p-i-n 结构日盲 APD 器件, 发现增益在低场强下呈现软击穿现象, 最终达到饱和而并未出现盖革击穿。器件在 60 V 时获得最大增益为 700, 通过模拟分析, 此时的电场强度约为 1.7 MV/cm<sup>[10]</sup>。同年, Turgut Tut 报道了肖特基结构的 AlGaIn 基日盲 APD 器件, 在 72 V 反偏电压下得到可重复增益为 25, 该器件也未发现明显的盖革击穿现象。在 25 V 反偏电压下, 器件的量子效率达到 55%<sup>[11]</sup>。

2007 年, R. McClintock 报道了背照射结构的 GaN 基 APD 器件, 并且研究了雪崩击穿电压与本征层厚度的关系, 得到发生雪崩击穿的临界场强为 2.73 MV/cm。通过研究正照射与背照射器件的光谱响应, 发现空穴的碰撞离化系数高于电子, 并且发现电子注入时器件的过剩噪声大于空穴, 证实了之前的结论<sup>[12]</sup>。2008 年, J. L. Pau 报道了背照射吸收与倍增分离 (SAM) 结构的 GaN 基 APD 器件, 材料结构为 p-i-n-i-n, 面积为 225  $\mu$ m<sup>2</sup> 的器件最大增益为 41 200, 并研究了器件在 90~108 V 时的噪声特性, 在低频波段, 器件的噪声由 1/f 噪声主导, 在稍高频率波段由倍增噪声决定<sup>[13]</sup>。

2006 年, J. B. Limb 等报道了基于 GaN 体材料采用 MOCVD 方法外延生长 GaN 材料的 APD 器件。报道称基于 GaN 体材料外延生长的 GaN 薄膜材料, 可以有效减小位错密度。当器件产生雪崩增益时, 对应的电场强度约为 2.8 MV/cm, 雪崩击穿电压温度系数为 0.05 V/K, 直径为 50  $\mu$ m 的器件雪崩增益大于 1000, 这是当时有报道的最好结果<sup>[14]</sup>。2010 年, Z. Vashaei 等报道了基于 m 面自支撑 GaN 体材料衬底采用 MOCVD 外延生长的 GaN 材料的 APD 器件, 在雪崩击穿之前, 器件的暗电流只有 8.11 pA, 最大增益约为 8 000<sup>[15]</sup>。

国内关于 GaN 基 APD 器件的研究也有了长足发展。2007 年, 中国科学院上海技术物理研究所许金通报道了国内第一只 GaN 基雪崩光电二极管, 器件光敏面直径为 40  $\mu$ m, 反偏电压 58 V 时, 测得雪崩增

益为  $3^{[16]}$ 。2009年,该单位王玲又报道了 GaN 基雪崩光电二极管中本征层厚度对带间隧穿电流的影响<sup>[17]</sup>。同年,中科院北京半导体研究所 W. B. Liu 等报道了直径为  $200\ \mu\text{m}$  的 GaN 基 APD 器件,最终测试雪崩增益为  $57^{[18]}$ 。2010年,中山大学的 Lu Sun 等报道了具有高增益的 AlGaIn 日盲雪崩光电二极管,器件零偏时在  $270\ \text{nm}$  处的量子效率为  $37\%$ ,在  $62\ \text{V}$  反偏电压下获得器件增益大于  $2\ 500^{[19]}$ 。2011年,中科院上海技术物理研究所王晓东等报道了 SAM 结构 GaN 基 APD 器件的理论拟合研究<sup>[20]</sup>。

GaN 材料碰撞离化的理论研究,主要采用系综蒙特卡洛方法(ensemble Monte Carlo technique),计算纤锌矿与闪锌矿 GaN 材料中的电子与空穴在高场下的输运性质<sup>[21]</sup>。理论计算表明,在高场下,空穴的碰撞离化系数高于电子,按照经典的碰撞离化系数与倍增噪声的理论,由空穴倍增占主导地位的 APD 器件性能优于电子倍增占主导的器件<sup>[22]</sup>。

## 2 GaN 基雪崩光电二极管性能

GaN 材料结构为 p-i-n 结构,采用 MOCVD 设备外延生长。在蓝宝石衬底上先生长较厚 GaN 缓冲层,然后分别生长掺 Si 的 n+ GaN 层,厚度为  $2\ \mu\text{m}$ ,电子浓度约为  $1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ ,非故意掺杂层,呈弱 n 型,厚度为  $0.2\ \mu\text{m}$ ,电子浓度约为  $5 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ,掺 Mg 的 p GaN 层,厚度为  $0.2\ \mu\text{m}$ ,空穴浓度约为  $5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 。每一个单元器件直径为  $40\ \mu\text{m}$ ,光敏面由感应耦合等离子体(ICP)刻蚀形成。在 p GaN 表面采用热电子束蒸发生长欧姆接触电极 Ni/Au/Ni/Au,厚度为  $20/20/20/20\ \text{nm}$ ,在空气氛围中  $550\ ^\circ\text{C}$  条件下退火  $3\ \text{min}$ ,改善电极的欧姆接触性能,n 电极为 Ti/Al,厚度为  $50/50\ \text{nm}$ ,钝化层采用 PECVD 方法生长的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,延伸电极为离子束溅射方法生长的 Cr/Au,厚度为  $30/500\ \text{nm}$ 。

利用 Keithley236 测试了器件的电流-电压(IV)特性,并采用氙灯作为光源,测试了器件的增益特性。测试时,器件封装在杜瓦中,并将杜瓦置于屏蔽箱内减小外界干扰。器件的增益因子采用如下方法计算:首先测试无光时器件的电流  $I_d$ ,然后加氙灯光照,测试器件的电流  $I_p$ ,两者相减为器件的纯光电流  $I_{\text{pure}}$ 。由于加反偏电压后,耗尽区展开同样会导致器

件光电流变大,因此选取  $20\ \text{V}$  时的净光电流作为倍增初始光电流。则器件的增益因子为

$$\text{Gain} = \frac{I_{\text{pure}}}{I_{\text{pure}}(20\ \text{V})} = \frac{I_p - I_d}{I_{\text{pure}}(20\ \text{V})} \quad (1)$$

器件的 IV 特性及增益曲线如图 1 所示。

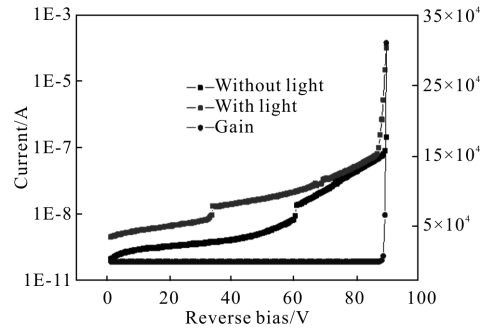


图1 GaN 基 APD 器件的 IV 特性及增益曲线

Fig.1 IV and gain characteristic curves for GaN-based APDs

在  $40\ \text{V}$  以下区域,暗电流随反偏电压增加缓慢变大,当电压超过  $40\ \text{V}$  后,暗电流随偏压增加呈现指数形式增长,对应带间隧穿电流, $88\ \text{V}$  时出现雪崩击穿。光电流在低偏压下远大于暗电流,反偏电压大于  $40\ \text{V}$  后,光电流增长速率小于暗电流。图 1 中暗电流与光电流曲线中出现的阶跃现象,由测试系统引起,对应着测试仪器在  $1\ \text{nA}$  处自动改变测试量程。器件的雪崩击穿电压为  $88\ \text{V}$ ,此时暗电流为  $6.08 \times 10^{-8}\ \text{A}$ ,估算此时器件倍增区域的场强为  $3\ \text{MV/cm}$ ,与参考文献报道的 GaN 材料的临界击穿场强相符<sup>[4]</sup>。试验测得器件最大增益大于  $3.1 \times 10^5$ 。

图 2 为 APD 器件零偏时的响应光谱。响应光谱测试采用氙灯作为光源,出射光线经单色仪分光后入射到器件光敏面上,器件采用正照射方式。从图 2 中可以看出,器件在  $310\ \text{nm}$  以下波段几乎无响应,

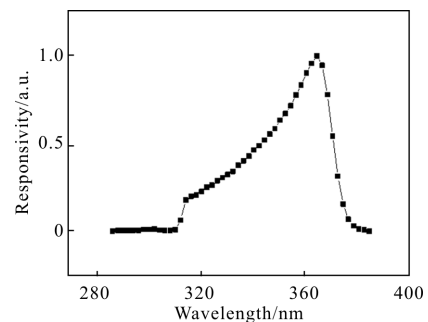


图2 GaN 基 APD 器件零偏时的响应光谱

Fig.2 Responsivity spectrum under zero bias for GaN-based APDs

主要原因是当入射光线波长小于 GaN 材料的吸收边(365 nm)后,材料的吸收系数随着入射光波长减小迅速增加,短波长的光线只能够入射到 p GaN 的表面。零偏时,光生载流子几乎扩散不到耗尽区,对应着器件在短波无响应。当入射光线波长增加时,其吸收系数逐渐减小,光线入射深度增加,器件的响应逐渐增加,在 365 nm 处达到峰值,此时的光电流由两部分组成:一部分由 p GaN 表面的光生载流子扩散形成,另一部分由入射到耗尽区内的光生载流子被内建电场分开形成。当入射光线波长大于 365 nm 时,器件的响应迅速减小。

### 3 GaN 基 APD 器件的暗电流研究

暗电流对于 APD 器件是非常重要的参数,过高的暗电流会增加器件的噪声水平,并且会限制器件的增益因子的提高。

从理论上研究了不同本征区厚度对器件暗电流的影响。在发生雪崩击穿时,耗尽层中的最大电场大于临界场强  $E_c$ 。对于  $p-i-n$  结构 APD 器件,存在经验公式<sup>[23]</sup>:

$$E_{max} = \frac{V}{0.5(W_i + W_{depl})} \quad (2)$$

式中:  $V = V_{bias} + V_{bi}$ ;  $W_{depl} = \sqrt{W_i^2 \frac{2\epsilon_r \epsilon_0 V}{qN_{eff}}}$ , 其中  $N_{eff}$  是有效掺杂浓度。根据公式(2),不同本征层厚度 APD 器件耗尽区电场强度与施加偏压的关系特性曲线如图 3 所示。三条曲线本征区的厚度分别为 0.1  $\mu\text{m}$ , 0.2  $\mu\text{m}$ , 0.4  $\mu\text{m}$ , 电场强度均随偏压增加而增加。当外加偏压为 40 V 时,本征区为 0.4  $\mu\text{m}$  的器件电场强度为 0.95 MV/cm, 0.1  $\mu\text{m}$  的器件为 3.6 MV/cm。薄的

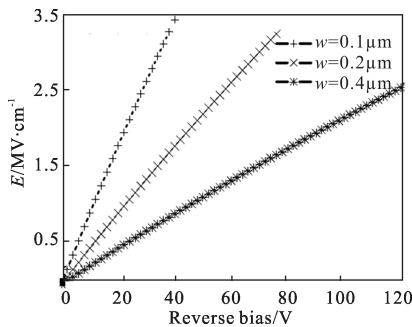


图 3 理论计算不同  $i$  层厚度的耗尽区中电场强度与偏压关系曲线  
Fig.3 Calculated electric field versus reverse bias characteristic in depletion region with different  $i$  layer widths

本征区在相同电压下,器件耗尽区中电场强度较大,将会使器件产生大的带间隧穿电流<sup>[15]</sup>。

根据半导体器件理论,直接禁带半导体带间隧穿电流公式为<sup>[24]</sup>:

$$I_{tun} = \frac{(2m^*)^{1/2} q EVA}{4\pi^2 h^2 Eg^{1/2}} \exp\left(-\frac{\theta m_0^{1/2} Eg^{3/2}}{qhE}\right) \quad (3)$$

经过计算发现,带间隧穿电流在低偏压下极小,此时可以认为暗电流主要由结区泄露电流和产生复合电流组成;隧穿电流随偏压增加迅速变大, $i$  层厚度对隧穿电流影响很大, $i$  层越薄,器件隧穿电流越大。

器件的暗电流特性曲线如图 4 所示,器件直径均为 30  $\mu\text{m}$ 。从图中可以看出,在相同偏压下暗电流随着  $i$  层厚度的增加而减小,这与前面理论计算结果相符合。0.2  $\mu\text{m}$  与 0.4  $\mu\text{m}$  的器件的暗电流曲线随电压呈指数形式增长,表明器件电流确实由隧穿电流主导,0.1  $\mu\text{m}$  器件暗电流在低偏压下增长较快,可能由结区泄露电流主导。三种器件均表现出雪崩击穿现象,0.1  $\mu\text{m}$ , 0.2  $\mu\text{m}$  的 APD 器件击穿电压分别为 43 V, 75 V, 0.4  $\mu\text{m}$  器件击穿电压大于 100 V,器件的雪崩击穿电压随着  $i$  层厚度的增加而增加。

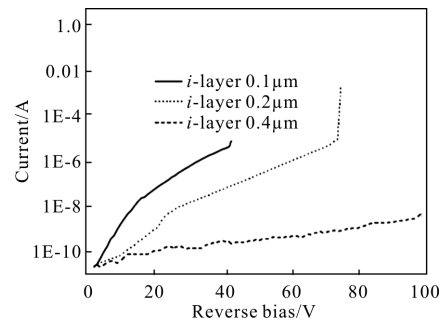


图 4 不同  $i$  层厚度 APD 器件暗电流与偏压关系曲线

Fig.4  $I-V$  characteristic of dark current of APDs with different  $i$  layer widths

对于理想 APD 器件,雪崩过剩噪声因子随着  $i$  层厚度的增加而增加,采用较薄  $i$  层的器件,有利于减小器件的过剩噪声<sup>[25-26]</sup>。然而,根据前面理论计算与实验结果,薄的  $i$  层将会产生较大带间隧穿电流,这可能会抵消过剩噪声因子减小的优势,甚至影响 APD 器件的性能。综合前面两种分析,并且考虑到实际应用中雪崩击穿电压不能太高,APD 器件的  $i$  层厚度一般取为 0.2  $\mu\text{m}$  左右。



### 4 基于相敏探测的 APD 器件测试系统

通常, GaN 基 APD 器件面积很小, 一般直径在几十微米左右, 器件的响应电流较小。当施加较高反向偏压时, 器件内部暗电流迅速变大, 导致器件的噪声变大, 发生雪崩击穿后, 器件内部的雪崩过剩噪声急剧变大, 并且测试系统内部不可避免地会出现其它噪声源, 这些都会对测试结果产生影响, 严重时根本无法测得器件的增益。而基于相敏探测技术的测试系统, 由于只对调制频率处的信号进行测试, 抑制其他频率处的噪声信号, 将大大提高测试的精度, 基于相敏探测技术搭建了 APD 器件测试系统。测试系统框图如图 5 所示。

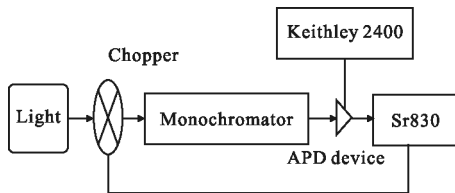


图 5 基于相敏探测技术的 APD 器件测试系统框图

Fig.5 Measurement system diagram based on phase sensitive detecting technique for GaN based APDs

光源发出的光束经斩波器调制后, 入射到 APD 器件上, APD 器件经外围电路由源表 Keithley2400 施加反向偏压, 并将光生电流耦合输出到锁相放大器 SR830 上, 斩波器连接锁相放大器, 提供参考频率。利用基于相敏探测的 APD 测试系统, 可以准确测试器件增益因子, 并且重复性良好。测得的增益曲线如图 6 所示。

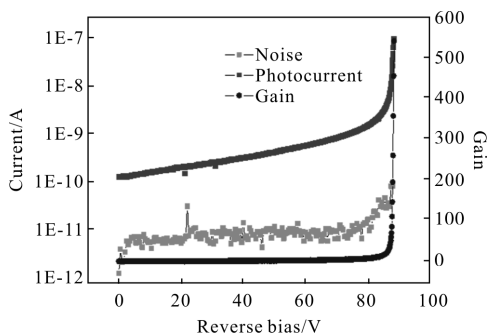


图 6 采用基于相敏探测系统测得的 APD 器件线性增益曲线

Fig.6 Gain curve for GaN-based APDs by phase sensitive detecting system

在低偏压下, 光电流随偏压缓慢变大, 原因是耗尽区随反偏电压增加而增加, 从而增加了器件的量子效率。当器件反偏电压超过 80 V 时, 器件增益明显变大, 近似呈指数形式增长, 表明器件内部开始产生雪崩离子化现象。最终测试结果为, 88.4 V 反偏电压下, 器件的最大增益为 540。

利用锁相放大器的噪声测试功能, 测试了 70 V 反偏电压下, 器件的噪声随调制频率的变化关系曲线, 如图 7 所示。

在低偏压下, 器件的噪声呈现明显的  $1/f$  噪声特性, 随着频率的增加而迅速变小, 这与文献报道的结果相符。由图 7 可以得出, 测试时斩波器的调制频率在允许的范围内应尽量调高, 以减小噪声的干扰。

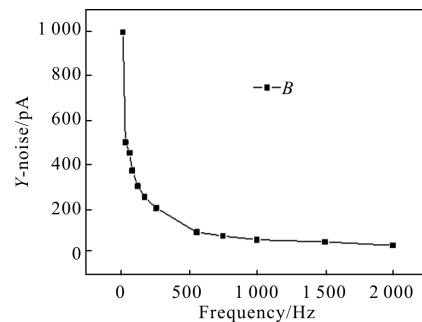


图 7 APD 器件噪声与调制频率关系曲线

Fig.7 Relationship characteristic curve between noise and modulate frequency for GaN-based APDs

APD 器件发生雪崩击穿之后, 器件内部噪声主要是雪崩过剩噪声, 由过剩噪声因子  $F$  表征。理论研究表明, 雪崩过剩噪声与电子空穴碰撞离子化系数  $\alpha$ 、 $\beta$  之比密切相关, 当  $\alpha$ 、 $\beta$  相差最大, 才会获得最小的过剩噪声因子。对于 GaN 基 APD 器件过剩噪声特性的研究, 尚在进行之中<sup>[23]</sup>。

### 5 盖革模式 GaN 基 APD 器件

APD 器件工作于雪崩击穿电压之上的工作模式称为盖革模式。该模式的 APD 器件, 需要配置外围淬灭电路。器件工作在雪崩击穿电压之上, 等待雪崩事件的发生。当光生载流子或热激发载流子(暗计数)触发雪崩事件时, 器件电流迅速变大, 直到触发外围电路, 雪崩事件由计数器记录, 然后淬灭电路将器件偏压降低, 使得器件中电流小于触发外围电路阈值电流。之后, 淬灭电路重新将器件偏压升高至雪崩击

穿电压之上,等待下一次雪崩事件的发生。

盖革模式工作的 APD 器件的两个重要参数分别是:单光子探测效率(Single Photon Detection Efficiency, SPDE)与暗计数率(Dark Count Probability, DCP)<sup>[27]</sup>。SPDE 是单个人射光子被探测到的概率,由器件的外量子效率与载流子触发的雪崩事件被探测到的概率的乘积得出。DCP 是由非光子触发引起的输出脉冲计数。

2000 年, K. A. McIntosh 等报道了工作于盖革模式下的 GaN 基 APD 器件,测试了被动淬灭模式与门模式下器件的性能。这是 GaN 基 APD 器件工作于盖革模式的首次报道。测试得到最大的 SPDE 为 13%,同时测得的 DCP 为 400 KHz。在 90%雪崩击穿电压处,器件的暗电流小于 20 nA<sup>[29]</sup>。2007 年, J. L. Pau 等在文章中介绍了工作于盖革模式的背照射 GaN 基 APD 器件,在最小面积器件中,器件的 SPDE 达到 20%,DCP 小于 10 KHz<sup>[27]</sup>。2010 年, E. Cicek 等报道了两种不同类型 GaN 材料 APD 器件盖革模式工作特性,两种 GaN 材料分别为基于蓝宝石衬底异质外延生长与采用自支撑 GaN 体材料衬底外延生长。前者正照射时最大 SPDE 为 13%,背照射时为 30.5%,暗计数率为 0.57,后者由于材料结构只能进行正照射,最大 SPDE 为 24.3%,暗计数率为 0.41<sup>[29]</sup>。基于蓝宝石衬底的 GaN APD 器件,背照射时其性能明显优于正照射,是由于背照射时发生倍增的载流子主要是碰撞离化系数较大的空穴<sup>[29]</sup>。

工作于盖革模式的 GaN 基 APD 器件由于其固有的高增益特点,主要用于非常微弱的紫外信号探测,比如生物预警探测、非直视空间光通信等,此时的紫外信号仅有几十个光子左右。

## 6 结束语

文中首先对 GaN 基 APD 器件的研究进展进行了回顾;重点介绍了高性能 APD 器件的测试结果,器件的最大增益大于  $3.1 \times 10^5$ ;研究了不同本征区厚度对器件暗电流的影响,结果表明器件在雪崩击穿之前暗电流主要由带间隧穿电流组成;最后介绍了基于相敏探测的 APD 器件测试系统,可重复测得 APD 器件稳定增益,并介绍了噪声随调制频率的变化关系,呈  $1/f$  噪声特性。

## 参考文献:

- [1] Li Xiangyang, Xu Jintong, Tang Yingwen, et al. GaN based ultraviolet detectors and its recent development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 276-280. (in Chinese) 李向阳, 许金通, 汤英文, 等. GaN 基紫外探测器及其研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 276-280.
- [2] Chen Liang, Zhang Yan, Chen Jun, et al. Fabrication and characterization of back-illuminated GaN/AlGaIn p-i-n UV detectors with high performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 928-931. (in Chinese) 陈亮, 张燕, 陈俊, 等. 高性能背照射 GaN/AlGaIn p-i-n 紫外探测器的制备与性能[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 928-931.
- [3] Zhang Yan, Wang Nili, Sun Jinglan, et al. New AlGaIn/PZT ultraviolet/infrared dual-band detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 210-212. (in Chinese) 张燕, 王妮丽, 孙璟兰, 等. 新型的 AlGaIn/PZT 材料紫外/红外双波段探测器 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 210-212.
- [4] McClintock R, Pau J L, Minder K, et al. III-Nitride avalanche photodiodes [C]//SPIE, 2009, 7222: 72220U1-72220U12.
- [5] McClintock R, Pau J L, Minder K, et al. III-Nitride photon counting avalanche photodiodes [C]//SPIE, 2008, 6900: 69000N1-11.
- [6] Osinsky A, Shur M S, Gask R, et al. Avalanche breakdown and breakdown luminescence in p-π-n GaN diodes [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(7): 691-692.
- [7] McIntosh K A, Molnar R J, M ahoneyl L J, et al. GaN avalanche photodiodes grown by hydride vapor-phase epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75(22): 3485-3487.
- [8] Carrano J C, Lambert D J H, Eiting C J, et al. GaN avalanche photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(7): 924-926.
- [9] Yang B, Li T, Heng K, et al. Low dark current GaN avalanche photodiodes [J]. *Quantum Electronics Letters*, 2000, 36(12): 1389-1391.
- [10] McClintock R, Yasan A, Minder K, et al. Avalanche multiplication in AlGaIn based solar-blind photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(24): 241123\_1-241123-3.
- [11] Tut T, Butun S, Butun B, et al. Solar-blind AlxGa1-xN-based avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(22): 223502\_1-223502\_3.

- [12] Mcclintock R, Pau J L, Minder K, et al. Hole-initiated multiplication in back-illuminated GaN avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (14): 141112\_1-141112\_3.
- [13] Pau J L, Bayram C, Mcclintock R, et al. Back-illuminated separate absorption and multiplication GaN avalanche Photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92 (10): 101120\_1-101120\_3.
- [14] Limb J B, Yoo D, Ryou J H, et al. GaN ultraviolet avalanche photodiodes with optical gain greater than 1000 grown on GaN substrates by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89 (1): 011112\_1- 011112\_3.
- [15] Vashaei Z, Cicek E, Bayram C, et al. GaN avalanche photodiodes grown on m-plane freestanding GaN substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(20): 201908\_1-201908\_3.
- [16] Xu Jintong, Chen Jun, Chen Jie, et al. Fabrication and device characteristics of GaN-based avalanche photodiodes [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37 (S1): 954-956, 960. (in Chinese)
- [17] Wang L, Bao X C, Zhang W J, et al. Effects of the intrinsic layer width on the band-to-band tunneling current in p-i-n GaN-based avalanche photodiodes [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, 24 (2009): 0095006\_1-6.
- [18] Liu W B, Zhao D G, Sun X, et al. Stable multiplication gain in GaN p-i-n avalanche photodiodes with large device area [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, 42: 015108\_1-5.
- [19] Sun L, Chen J L, Li J F, et al. AlGaIn solar-blind avalanche photodiodes with high multiplication gain [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(19): 191103\_1- 191103-3.
- [20] Wang Xiaodong, Hu Weida, Chen Xiaoshuang, et al. Electro-optical characteristics of separate absorption and multiplication GaN avalanche photodiode[C]//NUSOD, 2011, 11: 39-40.
- [21] Bertazzi F, Moresco M, Bellotti E. Theory of high field carrier transport and impact ionization in wurtzite GaN. Part I: A full band monte carlo model [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063718\_1- 063718\_12.
- [22] Oguzman I H, Bellotti E, Brennan K F, et al. Theory of hole initiated impact ionization in bulk zincblende and wurtzite GaN[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(12): 7827-7834.
- [23] Guo X Y. High performance ultraviolet 4H-SiC avalanche photodiodes[D]. USA:Thesis University of Texas, 2005.
- [24] Forrest S R, Didomenico M, Smith R G, et al. Evidence for tunneling in reverse-biased III-V photodetector diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 1980, 36(7): 580-582.
- [25] Reklaitis A, Regglani L. Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97 (4): 043709\_1-043709\_8.
- [26] McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes [J]. *IEEE Transactions of Electron Devices*, 1966, 13(1): 164-168.
- [27] Pau J L, Mcclintock R, Minder K, et al. Geiger-mode operation of back-illuminated GaN avalanche photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(4): 041104-1- 041104\_3.
- [28] McIntosh K A, Molnar R J, Mahoney L J, et al. Ultraviolet photon counting with GaN avalanche photodiodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(26): 3938-3940.
- [29] Cicek E, Vashaei Z, Mcclintock R, et al. Geiger-mode operation of ultraviolet avalanche photodiodes grown on sapphire and free-standing GaN substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(26): 261107\_1- 261107\_1.