

文章编号:1001-5078(2007)增刊-0954-03

氮化镓基雪崩光电二极管的研制

许金通¹, 陈俊¹, 陈杰¹, 王玲¹, 储开慧¹, 张燕¹, 李向阳¹, 龚海梅¹, 赵德刚²
(1. 中国科学院上海技术物理所传感技术国家重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要:文章简单回顾了氮化镓基雪崩光电二极管的发展现状, 从制作高响应率、低漏电流的雪崩器件出发, 详细阐明了制作氮化镓基雪崩光电二极管的工艺过程, 特别考虑了干法刻蚀带来的物理损伤以及后续的消除损伤处理。由于雪崩器件对于材料的质量具有较苛刻的要求, 因此特别对材料进行了必要的筛选。通过一系列工艺上的改进, 成功地制作出国内第一只氮化镓基雪崩光电二极管, 器件的光敏面直径是 $40\mu\text{m}$; 并对其进行了光电性能测试。测试结果表明, 当反向偏压是 58V 时, 漏电流大约是 $1.18 \times 10^{-7}\text{A}$, 雪崩增益是 3。

关键词:氮化镓; 雪崩光电二极管; 漏电流

中图分类号: TN23; TN312+.7 **文献标识码:** A

Fabrication and Device Characteristics of GaN-based Avalanche Photodiodes

XU Jin-tong¹, CHEN Jun¹, CHEN Jie¹, WANG Ling¹, CHU Kai-hui¹, ZHANG Yan¹
LI Xiang-yang¹, GONG Hai-mei¹, ZHAO De-gang²

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The development of GaN-based avalanche photodiodes was reviewed in this letter. Focused on fabricating high responsivity and low leakage current, the processes was related in detail, specially considering of physical damage induced in dry-etched course and subsequent treatment aimed to remove the damage. Due to the great rely between avalanche device and material, it is the key issue to select out top-quality material. By optimizing the processes, GaN-based avalanche photodiode was fabricated successfully, firstly in China. The effective diameter of devices was $40\mu\text{m}$. The response of device was tested. It shows that the leakage current of the device was about $1.18 \times 10^{-7}\text{A}$ and avalanche multiplication was determined to be about 3 when the reverse bias was 58 V.

Key words: GaN; avalanche photodiodes; leakage current

1 引言

过去几年, 以氮化镓为代表的宽禁带半导体材料和器件取得了显著的进展^[1-3], 它们在短波发光二极管、场效应晶体管、紫外探测器等方面中的应用均取得了重要突破, 有些已经达到了实用化的水平。但是, 由于近地 ($3 \sim 40$) km 大气层在紫外波段的强吸收, 达到地面的紫外光强度很弱, 特别是在日盲波段 ($200 \sim 300\text{nm}$)。对于工作在紫外波段的氮化

镓基光伏型探测器, 其响应率还有待于进一步的提高; 其中一个发展的方向是制作雪崩光电二极管, 即具有高内量子增益的光伏器件。氮化镓基雪崩光电二极管一般采用 PIN 结构, 以不含铝组分的居多, 这是因为雪崩光电二极管对材料质量的要求很高,

作者简介: 许金通 (1979 -), 男, 2002 级硕博连续研究生, 主要从事氮化镓基紫外探测器的研究。E-mail: ahhsoon@sohu.com
收稿日期: 2007-07-03

而含铝组分的氮化镓基薄膜材料的缺陷密度还很高,不易制成雪崩光电二极管。最早的关于氮化镓基雪崩光电二极管的报道是1998年A. Osinsky等报道的^[4],最大雪崩增益在3.0左右,光电流为30 μ A左右。此后,美国的很多科研小组进一步发展了氮化镓基的雪崩光电二极管(GaN-based Avalanche Photodiode, GaN-based APD),有德克萨斯州立大学奥斯丁分校、麻省理工学院的林肯实验室和联邦军事科学院^[5]。

对于氮化镓基雪崩光电二极管来说,器件的光敏面直径一般不能超过50 μ m,否则会引发缺陷相关的微等离子体效应,漏电流会较大。1999年K. A. McIntosh等^[6]把GaN-Based APD的雪崩增益倍数提高到10,2000年J. C. Carrano等^[5]把这个数值进一步提高到25,随后2000年、2001年K. A. McIntosh等^[7]研制出单光子计数模式或盖革模式工作的氮化镓雪崩光电二极管。报道的氮化镓雪崩光电二极管的雪崩击穿电场大约是(3~4) MV/cm^[6-7]。含铝组分雪崩光电二极管一直到2005年11月才出现,土耳其的Turgut Tut等^[8]报道了利用I-Al_{0.38}Ga_{0.62}N/N⁺-Al_{0.38}Ga_{0.62}N/N⁺-GaN材料来制作肖特基结构的日盲波段铝镓氮雪崩光电二极管,肖特基结构可以避免制作P型高铝欧姆接触的难题;最后他们得到的雪崩增益大于25,雪崩击穿电场大约是1 MV/cm。其后,2005年12月美国西北大学的研究小组报道了PIN结构的AlGaN日盲波段雪崩光电二极管,得到的最大雪崩增益大约是700,雪崩击穿电场大约是1.7 MV/cm^[9]。我们采用异质结结构的材料,充分考虑雪崩光电二极管的特性,成功制备了具有光电倍增效应的器件。下面将详细论述制作氮化镓基雪崩光电二极管的工艺过程和测试。

2 器件结构和工艺

器件结构如图1所示。在图1中,薄膜材料是背照射可见盲结构,材料采用MOCVD生长。图2是其透射光谱测试结果。由图2可知,在可见光波段材料的透过率大约在80%,可观察到清晰的干涉现象,这意味着材料生长质量良好。

0.15 μ m P-GaN
0.20 μ m I-GaN
0.75 μ m N ⁺ -Al _{0.324} Ga _{0.676} N
0.15 μ m AlN buffer layer
Sapphire substrate

图1 背照射可见盲材料结构示意图

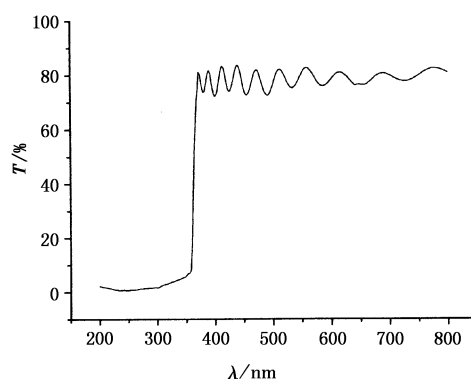


图2 材料的紫外可见透射光谱测试

对于氮化镓基雪崩光电二极管而言,器件的光敏面的直径一般需要小于50 μ m,这样可以增大整个器件避开缺陷的概率,提高雪崩器件的成品率,我们设计的器件的直径为40 μ m。器件的P电极采用延伸电极,延伸电极长在绝缘层二氧化硅上,二氧化硅采用PECVD生长,其厚度是400nm。工艺流程图如图3所示。

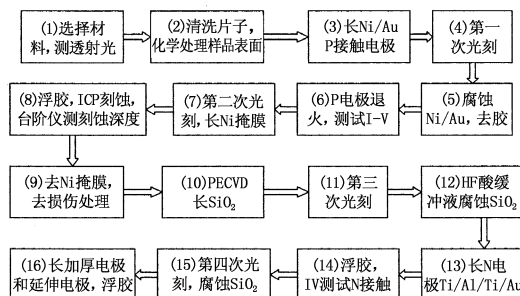


图3 氮化镓基雪崩光电二极管流片流程图

下面说明工艺流程中的各个步骤中需要考虑的一些细节。步骤(2)清洗片子,主要是先用有机溶剂清洗,以去除表面的有机杂质,同时用去离子水和酒精基盐酸去除无机杂质以及表面的氧化层,最后用氮气吹干。步骤(3)长P电极,一般采用Ni 20nm/Au 20nm/Ni 20nm/Au 20nm四层合金结构,经步骤(4)光刻后,腐蚀Ni/Au/Ni/Au,此时注意控制钻蚀,每一次腐蚀时间不宜过长,多次反复效果较佳。步骤(6)中的退火一般在空气气氛中进行,采用快速热退火过程;退火后,测试I-V,以确保P电极良好的欧姆接触性能。在步骤(8)中,采用ICP刻蚀,以减小对材料的刻蚀损伤,刻蚀到N⁺层,刻蚀时可以减慢速度,延长刻蚀时间,刻蚀后测试刻蚀台阶,以确保刻蚀深度。步骤(9)最好能够尽快进行,以减少镍掩膜的氧化程度,利于后续的去除。在步骤(9)中可以采用热退火或等离子体处理等方法以进一步减小刻蚀损伤。步骤(10)中,采用等离子体增强的化学气相淀积法(PECVD)生长二氧化硅,

为了使绝缘性能良好,生长了400nm。经步骤(11)光刻后,用氢氟酸缓冲液腐蚀二氧化硅,为了尽量减小钻蚀,应该在步骤(10)中采用硅片作为陪片,然后在步骤(12)中先在硅片陪片中摸索HF缓冲液的腐蚀速率,也可以采用先干法刻蚀后湿法刻蚀的方法。经步骤(13)生长N接触电极后,在步骤(14)中浮胶,然后通过测试 $I-V$ 判断N电极的欧姆接触性能,如果不好,则可以进一步在氮气气氛中退火,以形成良好的欧姆接触。步骤(15)、(16)开P电极孔和N电极孔,最后生长延伸电极和加厚电极。加厚可以用Cr 20nm/Au 250nm,加Cr的目的是为了增加金属与二氧化硅之间的黏性,确保电极不脱落。图4是流片完成后的芯片照片。

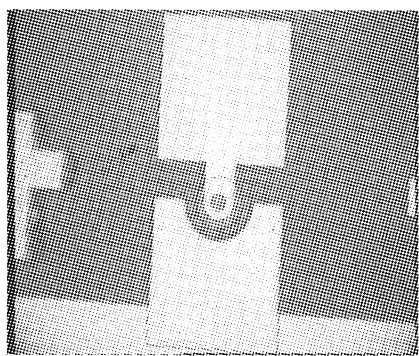


图4 流片完成后的氮化镓基雪崩光电二极管

3 测试和分析

雪崩光电二极管的测试主要是暗电流的测试和加紫外光照在不同反向偏压下的光电流的测试。图5为不加紫外光照和加紫外光照下的伏安特性曲线测试。

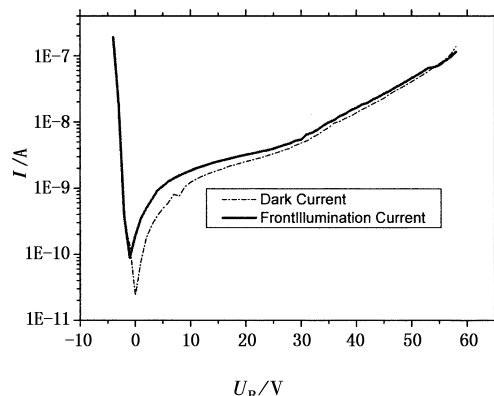


图5 氮化镓基雪崩光电二极管伏安特性曲线

由图5可以看出,器件的暗电流与平常的PIN器件相比是比较低的,当反向偏压是50V时,暗电流大约是 4.07×10^{-8} A,在图5中最大的反向偏压是58V,此时暗电流大约是 1.18×10^{-7} A;在反向偏压较小时(≤ 30 V),正照射电流比暗电流大,这是因

为光电流的缘故。在实验中,器件的暗电流还是偏大,当反向偏压超过58V时,器件的光电流和暗电流几乎重合,因此无法通过一般的 $I-V$ 测试来计算雪崩增益,下面利用调制盘、Stanford SR-570低噪声电流放大器和可存储示波器,来测试雪崩器件的雪崩增益,图6是测试系统示意图。

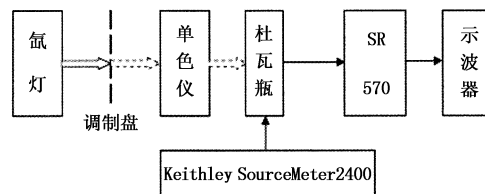


图6 雪崩光电二极管雪崩增益测试系统示意图

在图6中,利用一个调制盘把入射光进行调制,而后进入单色仪,最后把器件放在杜瓦瓶中,利用一个电压源 Keithley SourceMeter 2400 给器件加反向偏压,器件的电流通过 Stanford SR-570 进行放大,最后利用示波器显示并存储信号。由于调制的作用,因此可以把信号和暗电流及噪声分离,有利于提高信噪比,这样就得到正入射情况下信号随反向偏压的变化,如图7所示。

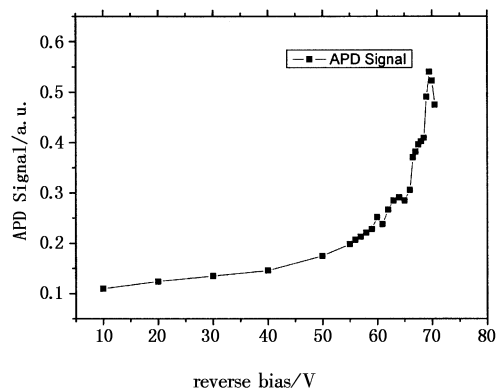


图7 雪崩光电二极管在正入射情况下信号随反向偏压的变化

在图7中,雪崩光电二极管的响应随反向偏压的增大而增大,当反向偏压超过60V时,雪崩光电二极管的光电响应开始明显增大,估计在反向偏压是70V左右,雪崩增益倍数大约是3。

4 结论

本文简述了氮化镓基雪崩光电二极管的发展现状、工艺步骤和光电性能测试等。测试结果表明,在正入射情况下,器件的暗电流与平常的PIN器件相比是比较低的,当反向偏压是50V时,暗电流大约是 4.07×10^{-8} A;反向偏压是58V,暗电流大约是 1.18×10^{-7} A。最后利用光调制的方法,测试得到,当反向偏压是70V左右,雪崩增益倍数大约是3。

(下转第960页)

种现象可能是由于辐照在材料内存在的大量缺陷(如N空位)造成的,不排除由于辐照引起的晶格变化,使得材料体内应力变化而导致蓝移^[8]。在主发光峰的高能端出现的峰,可能是一些缺陷的亚稳态形成的,这一猜测可以通过对材料进行适当的退火进行确定,这还有待实验的进一步验证。

我们认为,GaN基PIN器件在经过质子辐照后,响应峰值位置向短波方向的移动,与PL谱得到的主发光峰蓝移有关。而由于辐照在材料内产生的缺陷能级会起到复合中心的作用,这会增大器件的反向暗电流。同时在器件有光照时,光生载流子被这些复合中心通过复合而损失掉,从而造成器件的响应率降低。

4 结 论

制备了GaN PIN结构的紫外探测器并进行质子辐照实验,并测量了辐照前后PIN器件的 $I-V$ 曲线和光谱响应曲线。实验表明,质子辐照使器件的反向暗电流增加, $I-V$ 特性表明,辐照使器件的反向暗电流增大,正向开启后电流减小,并减小了器件的响应率,使峰值响应波长向短波方向稍有移动。对非故意掺杂的GaN材料进行了质子辐照,Raman谱表明辐照使得载流子浓度降低,PL谱表明辐照在GaN材料内形成了N空位及一些缺陷的亚稳态。并根据这些结果,对器件的辐照失效做了分析。

致 谢:中国科学院半导体所赵德刚副研究员为本文提供了GaN材料,在此表示衷心的感谢!

(上接第956页)

致 谢:感谢朱龙源、张红妹、袁永刚和孔令才等人在流片和器件测试中的帮助。

参考文献:

- [1] S D Wolter, B P Luther, R J Molnar. X-ray photoelectron spectroscopy and x-ray diffraction study of the thermal oxide on gallium nitride [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 2156 - 2158.
- [2] Jong Kyu Kim, Jong-Lam Lee, Jae Won Lee, et al. Effect of surface treatment by $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ solution on the reduction of ohmic contact resistivity of p-type GaN [J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 1999, 17: 497 - 499.
- [3] Jong-Lam Lee, Jong Kyu Kim, Jae Won Lee, et al. Effect of surface treatment by KOH solution on ohmic contact formation of p-type GaN. Solid-State Electronics, 1999, 43: 435 - 438.

参考文献:

- [1] Umana-Membreno G A, Dell J M, Hessler T P, et al. ^{60}Co gamma-irradiation-induced defects in n-GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80 (23): 4354 - 4356.
- [2] Polenta L, Fang Z-Q, Look D C. On the main irradiation-induced defect in GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76 (15): 2086 - 2088.
- [3] Wang Ching-Wu. Neutron irradiation effects on visible-blind Au/GaN Schottky barrier detectors grown on Si (111) [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80 (9): 1568 - 1570.
- [4] Wang R X, Xu S J, Fung S, et al. Micro-Raman and photoluminescence studies of neutron-irradiated gallium nitride epilayers [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 031906.
- [5] Emtsev V V, Davydov V Y, Haller E E, et al. Radiation-induced defects in n-type GaN and InN [J]. Phys. B, 2001, 308 - 310: 58 - 61.
- [6] Buyanova I A, Wagner M, Chen W M, et al. Photoluminescence of GaN: effect of electron irradiation [J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 73 (20): 2968 - 2970.
- [7] Look D C, Reynolds D C, Hemsky J W, et al. Defect donor and acceptor in GaN [J]. Phys. Rev. Lett., 1997, 79 (12): 2273 - 2276.
- [8] Kozawa T, Kachi T, Kano H, et al. Thermal stress in GaN epitaxial layers grown on sapphire substrates [J]. J. Appl. Phys., 1995, 77 (9): 4389 - 4392.
- [4] A Osinsky, M S Shur, R Gaska, et al. Avalanche breakdown and breakdown luminescence in pn-n GaN diodes [J]. Electronic Letters, 1998, 34: 691 - 692.
- [5] J C Carrano, D J H Lambert, C J Eiting, et al. GaN avalanche photodiodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76 (7): 924 - 926.
- [6] K A McIntosh, R J Molnar, L J Mahoney, et al. GaN avalanche photodiodes grown by hydride vapor-phase epitaxy [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 75 (22): 3485 - 3487.
- [7] K A McIntosh, R J Molnar, L J Mahoney, et al. Ultraviolet photon counting with GaN avalanche photodiodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76 (26): 3938 - 3940.
- [8] Turgut Tut, Serkan Butun, Bayram Butun, et al. Solar-blind $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based avalanche photodiodes [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 223502.
- [9] R McClintock, A Yasan, K Minder, et al. Avalanche multiplication in AlGaIn based solar-blind photodetectors [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 87: 241123.