光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.003

一种感光栅 GaN 基高电子迁移率晶体管紫外探测器

朱彦旭*，杨　壮，李赉龙，杨　忠，李锜轩

（北京工业大学 光电子教育部重点实验室，北京 100124）

摘　要： 利用 GaN 基高电子迁移率晶体管（HEMT）的栅控特性和铁电体的光伏效应机制，制备了一种新型（光敏感层/HEMT）光探测器件。主要研究了复合薄膜和溅射气氛对光敏感薄膜的光伏性能以及对新型感光栅极探测器的光探测能力的影响。结果表明，PZT/ZnO 复合薄膜的量子效率峰值达到 14.55%；有氧氛围下制备的 PZT 薄膜剩余极化强度达到 52.31 μC/cm²；沉积 PZT/ZnO 复合薄膜的探测器在紫外光照下相比于暗场下的源漏饱和电流最多增加 12.64 mA。可见，所制备的新型探测器对紫外光具有优良的探测能力，为光探测的研究提供了新的方向。

关键词： 氮化镓；铁电体；光伏效应；紫外光；光探测器

中图分类号： O741；O738　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0020－05

Study on GaN-based High Electron Mobility Transistor Ultraviolet Detector

ZHU Yanxu, YANG Zhuang, LI Lailong, YANG Zhong, LI Qixuan

(Key Laboratory of Photoelectron Technology of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, CHN)

Abstract: By using the gate control characteristics of GaN high electron mobility transistor (HEMT) and the photovoltaic effect mechanism of ferroelectrics, a new type of (photosensitive layer/HEMT) photo-detecting device was prepared. In this paper, mainly studied is the influence of film types and sputtering atmosphere on the photovoltaic performance of light-sensitive films and the light detection ability of the new photosensitive grid detector. The results show that the peak quantum efficiency of the PZT/ZnO composite film reaches 14.55%, and the residual polarization intensity of the PZT film prepared by passing oxygen during sputtering reaches 52.31 μC/cm². The saturation current of the detector deposited with PZT/ZnO composite film under UV light increased by 12.64 mA at most compared with that of the dark field source. It can be concluded that the new detector has an excellent ability to detect ultraviolet light, and it provides a new direction for the study of light detection.

Key words: GaN; ferroelectric; photovoltaic effect; ultraviolet light; photodetector

0　引言

光探测器（PD）是一种将光辐射信号转换成另一种易被接收处理的信号形式的传感器，如光电倍增管（PTM）、WBG 半导体光探测器等，广泛应用于火灾检测、军事防御、遥感成像等领域。在新型室温（RT）探测器研究领域，出现了背照式、多量子阱、焦平面阵列等光探测结构。Yang 等[1]设计了一种单晶薄膜（SC-TF）钙钛矿光探测器，该器件在 70 GHz 增益带宽和 180 Hz 调制带宽下，100 光子能级探测极限性能达到创纪录水平，在太阳电池和光探测等领域具有极强竞争力。然而，目前这些基于多晶薄膜有源层的钙钛矿（Perovskite）器件的性能仍落后于基于外延生长的半导体器件。而且，对可见光使用阻带滤光片会降低钙钛矿器件在紫外光范围内的量子效率。

收稿日期：2020－02－05.

基金项目：国家“863”计划项目；国家重点研究计划项目（2017YFB0402803）；教师队伍建设 15 青年拔尖项目（3011000543115002）.

* **通信作者：**朱彦旭　**E-mail：** zhuyx@ bjut.edu.cn

GaN 基高电子迁移率晶体管(HEMT)是调制掺杂异质结(AlGaN/GaN)场效应晶体管(FET)。异质结界面处势阱(Potential Well)中的载流子只在与阱壁平行的平面内聚集,形成高浓度的二维电子气(2-DEG),电子迁移率高达 2 000 $cm^2/(V \cdot s)$。因此,该类器件显示出极宽的跨导,且灵敏度高、响应速度快[2],已经成为光探测领域新的功能器件。

GaN 基 HEMT 器件的源-漏载流子传输特性与栅极电压强相关,此机制是该器件应用于半导体光探测器研制的基础。在此基础上 V 型槽栅、环形栅、凹形栅等光探测器件应运而生。韩国东国大学在 2019 年提出了一种在 HEMT 栅极处生长 ZnO 纳米阵列(NR)的探测结构[3]。通过光照前后 O_2 的吸附与解吸附对栅极电压进行调控,实现了对入射光的探测。因此,以栅极电压调控为基础,通过制备光敏感栅极,就能设计一种新型的 GaN 基 HEMT 光探测器。

铁电材料是一种新型感光材料,如弛豫型铁电陶瓷、磷酸二氢钾等。铁电体内部存在电偶极矩,具有光伏效应机制(Photovoltaic Effect)[4-5]。在光伏效应的作用下,光照时铁电体内部的正负极化电荷产生相对位移,形成感应电动势。因此,铁电材料是制备光敏感栅极的完美材料[6]。

利用 HEMT 器件的栅控特性和铁电体的光伏效应,在 GaN 基 HEMT 器件的栅极上沉积一层铁电薄膜,可制备一种新型(光敏感层/HEMT)光探测器。通过光照时铁电薄膜的光伏效应形成的光生电压,作用在器件的栅极上,改变源-漏间载流子传输特性,以此达到对光探测的目的[7]。

本文提出的新型光探测器的优点在于:(1)融合铁电材料和 HEMT 器件的优点,为光探测提供了新的探测机制;(2)结构可扩展性强,更换感光膜可以实现对紫外-可见-红外整个光谱的探测。

此外,光敏感薄膜的光伏性能对感光栅极 GaN 基 HEMT 探测器的光谱响应度、增益带宽等探测能力至关重要。ZnO 是一种宽禁带材料,在紫外光区具有较高的激子束缚能和光电导性能[8],而铁电薄膜具有较高的光伏系数。理论上,两者的复合薄膜间存在的界面耦合效应能有效提升薄膜的光伏性能[9]。因此,制备高质量的铁电/ZnO 复合薄膜是提高薄膜光伏性能的有效途径之一。此外,在溅射薄膜时,薄膜中元素的含量易受到溅射气氛的影响,这会导致薄膜结晶相的改变[11]。因此获得优良的溅射气氛也是提高薄膜光伏性能的途径之一。

本文在不同工艺条件下,采用射频磁控溅射法制备了四种铁电薄膜,并通过测试电滞回线和外量子效率(EQE)等性能指标研究了复合薄膜和溅射气氛对感光薄膜光伏性能的影响。然后把四种薄膜分别沉积到 GaN 基 HEMT 器件的栅极上,制备了感光栅极 HEMT 探测器。通过光照对比实验,测试了新型探测器对紫外光的探测能力,并分析了在不同工艺条件下制备的光敏感薄膜对新型探测器探测能力的影响。

1　铁电薄膜的制备与测试

1.1　铁电薄膜的制备工艺

实验以 Si/SiO_2 为衬底,采用磁控溅射法分别制备了 PZT(有氧)/ZnO,PZT(有氧),PZT(无氧),以及 $LiNbO_3$ 等四种铁电薄膜。薄膜的射频磁控溅射条件如表 1,制备薄膜结构如图 1。

表 1　溅射铁电薄膜的工艺参数

流量参数	PZT(有氧)/ZnO	PZT(有氧)	PZT(无氧)	$LiNbO_3$
气氛($Ar:O_2$)/(cm^3/min)	70∶2/40∶0	70∶2	45∶0	70∶2
厚度/nm	260/100	360	360	360

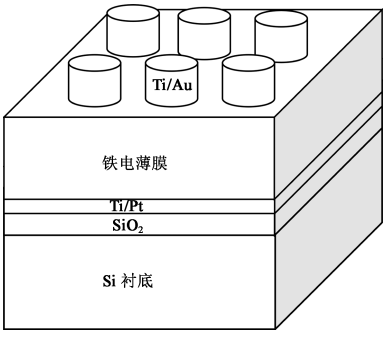


图 1　铁电薄膜样品结构示意图

实验采用的射频磁控溅射法以靶材为阴极,支撑衬底的基板为阳极,以辉光放电为基础,荷能离子轰击靶材产生原子沉积到衬底上,堆叠成完整的薄膜结构。磁控溅射法有三种可调节参数:本底真空度(Vacuum Degree)、基底温度和溅射气氛。其中,本底真空度、基底温度对薄膜质量影响较小,而溅射气氛容易与薄膜中所含元素发生化学反应,影响原子沉积速率及晶体晶相的生长,对薄膜质量影响较大。溅射完毕后采用快速退火(RTP)的方法使薄膜结晶化,从而生长出完整的钙钛矿结构。

电滞回线是铁电体的极化强度 P 随着外加场强 E 的变化轨迹,是反映铁电薄膜铁电性能、光伏

效应强弱的基础物理量。实验采用 RT Precision Workstation 标准铁电测试仪对薄膜的电滞回线(P-E)进行测试。P-E 回线的三个关键参数为:矫顽场(E_c)、剩余极化(P_r)和饱和极化(P_s)。量子效率(η),又称光谱响应,表示在特定波长光的照射下,光电器件单位时间内产生的平均光电子数与入射光子数之比,能有效反映出薄膜的光电转换能力:

$$\eta(\lambda)=\frac{N}{\frac{\phi(\lambda)}{h\nu}}=\frac{Nh\nu}{\phi(\lambda)} \tag{1}$$

其中,$\phi(\lambda)$是单色辐射功率,h 为普朗克常量,N 为产生光电子的数目,ν 为光频率。

1.2 铁电薄膜测试与讨论

1.2.1 电滞回线

图 2 为四种薄膜的电滞回线,表 2 为电滞回线的参数值,分析图 2 和表 2 可知,有氧条件下溅射的 PZT 薄膜饱和极化和剩余极化强度最大,分别为 143.99 和 52.31 $\mu C/cm^2$,矫顽电场最小为 21.25 kV/cm。其原因在于,溅射时通入的 O_2 为晶粒生长提供了充足的 O 原子,导致薄膜晶体晶界能下降,有利于晶粒充分生长。此外,PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜的极化强度较小。这是因为 ZnO 不是优良导体,测试时外加电压部分降落在 ZnO 薄膜上,影响了 PZT 薄膜的极化。从表 2 还可以看出,和 $LiNbO_3$ 薄膜相比,PZT 薄膜的铁电性能更加优异。

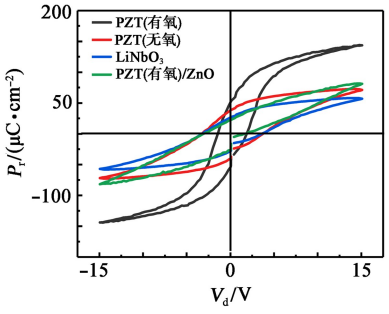


图 2 四种薄膜的电滞回线

表 2 四种薄膜电滞回线参数

参数	P_s/($\mu C/cm^2$)	P_r/($\mu C/cm^2$)	E_c/(kV/cm)
PZT(有氧)/ZnO	80.98	24.75	36.35
PZT(有氧)	143.99	52.31	21.25
PZT(无氧)	72.67	36.03	42.07
$LiNbO_3$	58.14	25.32	44.09

1.2.2 外量子效率

为了测试薄膜的外量子效率,以 ITO 导电玻璃为衬底溅射铁电薄膜,溅射结构如图 3。测试薄膜在 300～800 nm 波段光照下的外量子效率,测试结果如图 4。

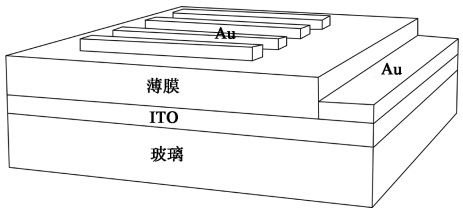


图 3 铁电薄膜结构示意图

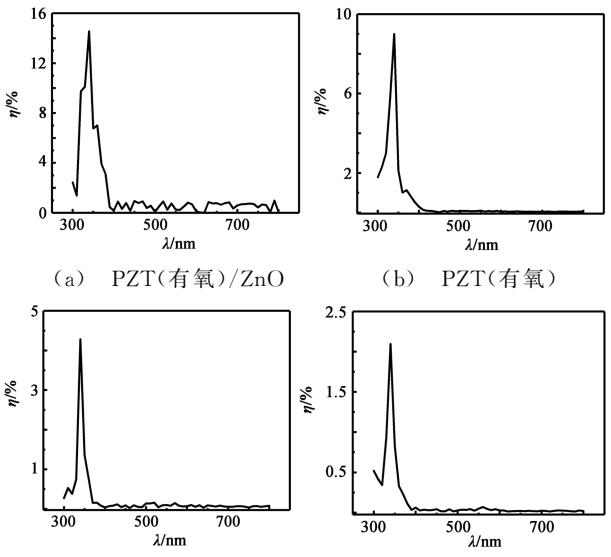


图 4 四种薄膜量子效率对比图

从图 4 可知,在 300～400 nm 波段光照射下,薄膜的外量子效率呈现较高状态。随着入射光波长增加,外量子效率呈下降趋势。从整体上看,PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜的外量子效率最大,峰值为 14.55%;其次是 PZT(有氧)薄膜、PZT(无氧)薄膜;最后是 $LiNbO_3$ 薄膜。

从结果分析得出,ZnO 材料优良的光电导特性、较大的激子束缚能以及复合薄膜间的界面耦合效应,使得 PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜对入射光具有强吸收并激发出高浓度的光生载流子。有氧氛围下制备的 PZT 薄膜的分子链有序排列,结晶度更加完整,光电转换能力显著。然而,目前制备出的 $LiNbO_3$ 薄膜对入射光的吸收能力较差,需要进一步优化工艺条件。

2 感光栅极 GaN 基 HEMT 的制备与测试

2.1 感光栅极 GaN 基 HEMT 的制备工艺

基于上述分析和讨论,提出具有感光栅极的 GaN 基 HEMT 探测结构,如图 5。

实验采用蓝宝石衬底的 AlGaN/GaN 异质结外延片制备感光栅极 GaN 基 HEMT 探测器。工艺步骤包括：(1) ICP 刻蚀出器件的有源区；(2) 沉积 200 nm 的 SiO_2 保护有源区；(3) 溅射源-漏电极，退火形成欧姆接触；(4) 溅射栅极(Ti/Pt)，并且作为光敏薄膜的底电极；(5) 在 HEMT 器件栅极上沉积感光薄膜，并退火使薄膜结晶化；(6) 溅射薄膜的金属上电极。

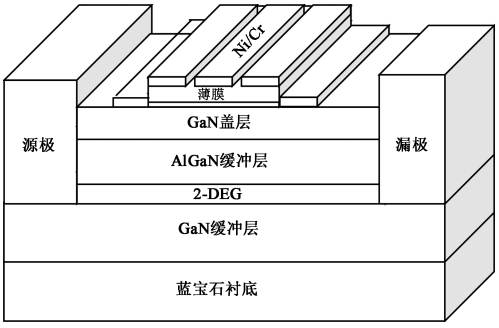


图 5　GaN HEMT 探测器结构图

2.2　测试结果分析

测试无感光栅极 GaN 基 HEMT 器件(如图 6)和四种感光栅 GaN 基 HEMT 探测器(如图 7)分别在暗场和 365 nm LED 紫外光源照射下的输出特性曲线(*I-V* 曲线)。通过对有无感光栅 GaN 基 HEMT 器件的饱和输出特性进行对比分析，研究新型感光栅 GaN 基 HEMT 探测器对紫外光的探测能力；在此基础上，进一步对比四种感光栅探测器的探测能力。其中源漏电压 V_{ds} 取值 0～15 V，栅极电压 V_{gs} 分别取－3，－2.5 和－2 V。

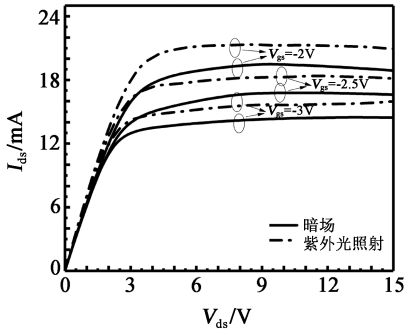
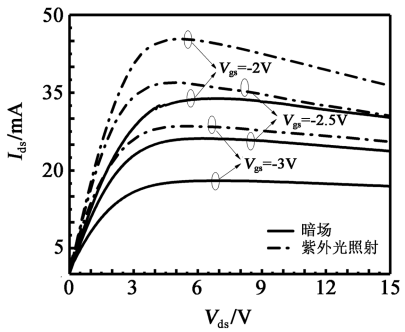


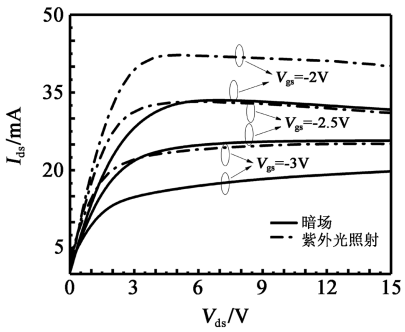
图 6　无感光栅 GaN 基 HEMT 器件输出特性曲线

从图 6 可知，无感光栅极 HEMT 器件的源-漏饱和电流稍许增加。这是因为 GaN 为宽禁带材料，具有一定的紫外光吸收能力，有载流子生成。因此，沟道中 2-DEG 的浓度增加，相应的源-漏饱和电流也会增加[11]。

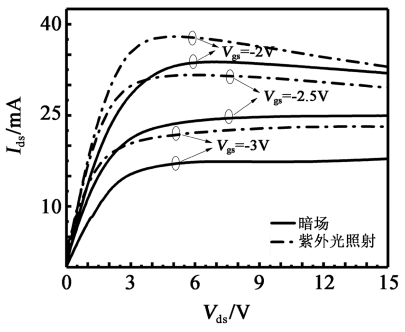
从图 6 和 7 可以看出，无感光栅器件在紫外光照射后的源-漏饱和电流相较于暗场情形只有稍许增加，而四种新型感光栅探测器均增加明显。这说明新型感光栅 GaN 基 HEMT 探测器确实具有优异的探测性能。四种感光栅极探测器中，溅射 $LiNbO_3$ 薄膜的器件在不同的栅压下饱和源漏电流分别增加 3.31，3.16 和 4.47 mA；溅射 PZT(无氧)



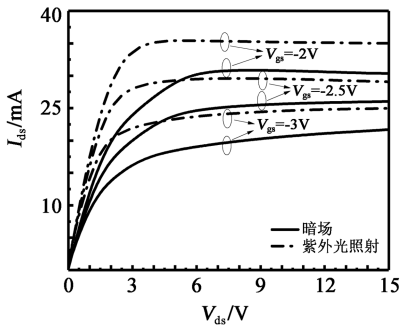
(a)　PZT(有氧)/ZnO



(b)　PZT(有氧)



(c)　PZT(无氧)



(d)　$LiNbO_3$

图 7　四种感光栅 GaN 基 HEMT 探测器输出特性曲线

薄膜的器件，分别增加 5.37，5.85 和 4.87 mA；溅射 PZT(有氧)薄膜的器件，分别增加 6.69，7.73 和 8.73 mA；溅射 PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜的器件分别增加 10.49，12.64 和 11.51 mA。由此可见，以 PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜为光敏感薄膜制备的探测器光谱响应最为显著。

从结果分析可知，由于光伏机制的存在，铁电薄膜作为光敏感薄膜，确实对 HEMT 器件的栅极电压具有优异的调控能力，制备的新型感光栅极探测器对紫外光具有显著的探测效果。另外，进一步对比发现，PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜对栅极电压具有更为优异的调控能力，以 PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜作为光敏感薄膜制备的探测器探测率最高。溅射 PZT 薄膜时通入少许氧气，使得晶粒生长得更加致密，结晶度更加完整，以此薄膜作为光敏感薄膜制备的探测器同样具有较高的探测效率。

探测器的输出电流在饱和后的一定时间内会略微下降，这是因为自热效应增强会导致沟道电子迁移率下降[12]。

3 结论

本文基于铁电薄膜的光伏效应机制和 GaN 基 HEMT 器件的栅控特性，提出一种具有光敏感栅极的新型(光敏感层/HEMT)半导体光探测结构，并成功制备了该器件。分析表明，新型感光栅极 GaN 基 HEMT 探测器对紫外光具有优异的探测能力。进一步对比发现，复合薄膜能将不同薄膜的优良特性结合起来，有助于提升薄膜的光敏性能。实验结果显示，以 PZT(有氧)/ZnO 复合薄膜为光敏感薄膜制备的探测器的探测性能最优异。在制备 PZT 薄膜时通入少许氧气同样有助于提升薄膜的光敏特性。此外，由于新型探测器的结构特点，更换光敏感薄膜可以实现对紫外-可见-红外宽光谱的探测，其探测机理对探索宽光谱探测器具有重要意义。

参考文献：

[1] Yang Z Q, Deng Y H. High-performance single-crystalline perovskite thin-film photodetector[J]. Adv. Materials, 2018, 30(8): 1704333.

[2] Zhu Jiyuan, Zhou Xingyu, Jing Liang, et al. Piezotronic effect modulated flexible AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors[J]. ACS Nano, 2019, 13(11): 13161-13168.

[3] Khan Fasihullah, Khan Waqar, Kim Sam-Dong. High-performance ultraviolet light detection using nano-scale-fin isolation AlGaN/GaN heterostructures with ZnO nanorods [J]. Nanomaterials, 2019, 9(44): 1-14.

[4] Zenkevich A, Matveyev Y, Maksimova K, et al. Giant bulk photovoltaic effect in thin ferroelectric $BaTiO_3$ films [J]. Phys. Rev. B, 2014, 90(16): 161409(1-4).

[5] 蔡田怡，睢　胜. 铁电体的光伏效应[J]. 物理学报，2018，67(15)：157801.
Cai Tianyi, Jui Sheng. Photovoltaic effect in ferroelectrics[J]. Acta Phys. Sin., 2018, 67(15): 157801.

[6] Butler Keith T, Frost Jarvist M, Walsh Aron. Ferroelectric materials for solar energy conversion: photoferroics revisited [J]. Energy and Environmental Science, 2015, 8(3): 838-848.

[7] 朱彦旭，宋会会，王岳华，等. 氮化镓基感光栅极高电子迁移率晶体管器件设计与制备[J]. 物理学报，2017，66(24)：247203.
Zhu Yanxu, Song Huihui, Wang Yuehua, et al. Design and fabrication of high electron mobility transistor devices with gallium nitride-based[J]. Acta Phys. Sin., 2017, 66(24): 247203.

[8] 高松华，高立华，陈礼炜. N/Al 共掺 ZnO 透明导电薄膜的制备及光电性能研究[J]. 半导体光电，2019，40(6)：830-832，851.
Gao Songhua, Gao Lihua, Chen Liwei. Preparation and photoelectric properties of N/Al co-doped ZnO transparent conducting thin films [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 830-832, 851.

[9] 潘丹峰. 铁电基复合薄膜的光伏效应及其调控研究[D]. 南京：南京大学，2016.
Pan Danfeng. Study on the photovoltaic effect of ferroelectric-based composite films and its manipulation [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.

[10] 孟详钦. PZT 基双层压电复合薄膜制备及性能研究[D]. 成都：电子科技大学，2014.
Meng Xiangqin. Preparation and properties of PZT-based double-layer piezoelectric films[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

[11] Qiao Hong, Yuan Jian, Xu Zaiquan, et al. Broadband photodetectors based on graphene-Bi_2Te_3 heterostructure[J]. ACS Nano, 2015, 9(2): 1886-1894.

[12] 刘翌寒，曹　伟，李绍娟，等. 一种基于 AlGaN 和石墨烯的紫外-红外双色探测器[J]. 发光学报，2015，36(10)：1167-1170.
Liu Yihan, Cao Wei, Li Shaojuan, et al. AlGaN and graphene based UV-IR dual-color detectors [J]. Chinese J. of Luminescence, 2015, 36(10): 1167-1170.

作者简介：

朱彦旭(1977—)，男，河北秦皇岛人，博士，副教授，主要从事 GaN 基 HEMT 器件、发光二极管、激光器、探测器等半导体器件的研究。