Design and Simulation of Flip Chip 3D Structured UV Detector *

HE Yingkun[1], RAO Haoyong[1], ZHENG Mengyan[1], SONG Wenqing[2], LI Tao[1,3]*
(1.School of Mechanical and Energy Engineering, Shaoyang University, Shaoyang Hu'nan 422000, China;
2.School of Intelligent Manufacturing and Mechanical Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang Hu'nan 421002, China;
3.Hunan Key Laboratory of Efficient Power System and Intelligent Manufacturing, Shaoyang Hu'nan 422000, China)

Abstract: Metal-semiconductor-metal (MSM) UV detectors are widely used in UV anti-virus, optical fiber communication, aerospace and other fields due to their high quantum efficiency and high response speed. Based on the traditional MSM structure, a flip chip MSM (FC-3DMSM) structure is proposed, the introduction of 3D structure and back incidence increases the light irradiation area, improves the migration path of photo-generated carriers in MSM devices, and improves the collection efficiency of photo-generated carriers, thereby significantly enhancing the photoelectric performance of the device. By changing the etching depth of the FC-3DMSM device, APSYS simulation software is used to establish the FC-3DMSM devices and traditional MSM structure devices, and the device performance influenced by various parameters is analyzed. The simulation results show that the photoelectric performance of the FC-3DMSM device has excellent improvement compared with the traditional MSM device. The photocurrent and the light responsivity of the FC-3DMSM device with an etching depth of 1.4 μm are increased by about 1.59 times and 1.79 times, respectively, compared with the traditional MSM device.
Key words: ultraviolet detector; metal-semiconductor-metal; APSYS; 3D structure; responsivity
EEACC: 7230C; 2560B **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2026.09.006

背入射式 3D 结构紫外探测器设计与仿真 *

何映坤[1], 饶浩勇[1], 郑梦琰[1], 宋文青[2], 李 滔[1,3]*
(1.邵阳学院机械与能源工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2.湖南工学院智能制造与机械工程学院, 湖南衡阳 421002;
3.高效动力系统智能制造湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000)

摘 要: 金属-半导体-金属(Metal-Semiconductor-Metal, MSM)紫外探测器由于其高量子效率和高响应速度在紫外杀毒、光纤通信、航空航天等领域具有广泛的应用。在传统的 MSM 结构基础上提出了背入射式 3DMSM(FC-3DMSM)结构, 3D 结构以及背入射的引入, 增加了光照射面积, 改善了 MSM 器件中光生载流子的迁移路径、提升了光生载流子的收集效率, 从而显著增强了器件的光电性能。通过改变 FC-3DMSM 器件的刻蚀深度, 利用 APSYS 仿真软件建立不同刻蚀深度 FC-3DMSM 器件以及传统 MSM 结构器件参数, 并分析了各参数对于器件性能的影响规律。结果表明, 经过刻蚀处理后的 FC-3DMSM 器件的光电性能相较于传统 MSM 器件显示出卓越的性能提升, 具体体现在刻蚀深度为 1.4 μm 的 FC-3DMSM 器件相较于传统的 MSM 器件光电流提升了约 1.59 倍, 光响应度提升了约 1.79 倍。
关键词: 紫外探测器; 金属-半导体-金属; APSYS; 3D 结构; 响应度
中图分类号: TN36 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2026)09-1966-06

高响应度的紫外探测器对太空探索、辐射监测、导弹制导以及紫外杀菌等领域具有重要意义。MSM 型紫外探测器具有高量子效率和响应速度, 更加适用于光电子集成电路和高速光纤通信系统等领域[1]。目前, Ⅲ族氮化物半导体因为拥有更宽的禁带、高热导率、高绝缘性等优势被广泛应用于紫外探测器[2], 三元合金 AlGaN 可以通过调节 Al 组分的含量, 实现禁带宽度从 3.4 eV 到 6.2 eV 的连续变化[3], 因此 AlN 材料可以用于制备高响应度、高灵敏度的紫外探测器[4]。Monroy 等[5]成功制备了一种抑制比达到了 10^4 数量级可见光盲的 MSM 型紫外探测器。这一成果揭示了 MSM 结构探测器在高抑制比和快速响应方面的显著优势。Li 等[6]研究了一种最大响应度为 0.3 A/W 的 AlN 基紫外探测器。朱彦旭等[7]制备了一种以源漏下刻蚀的 GaN 晶体管, 研究发现刻蚀深度对于器件的源漏饱和电流差值存在一定影响。在传统 MSM 器件的基础上, 经过结构的优化设计和仿真结果的深入分析, 我们

项目来源: 湖南省自然科学基金项目(2024JJ7495、2024JJ6197); 湖南省大学生创新创业训练计划项目(S202210547034)
收稿日期: 2024-07-02 **修改日期**: 2024-09-08

能够确定最合适的器件结构参数。同时还可以将此方法应用于其他类型器件中,从而提高其性能。Apsys、Silvaco TCAD、COMSOL 等均适用于对半导体器件的仿真分析。在仿真过程中可以通过仿真软件调整和优化器件各项参数,获取器件各项性能指标,并将其用于 MSM 器件的结构优化和电流密度评估,以提高器件的性能[8-12],并且能够得到不同掺杂条件下以及不同器件结构参数下的器件光电性能变化规律[13-14]。从载流子动力学方面分析,仿真计算可以得到 AlN 材料的带隙宽度和高饱和速度[15]。通过对已有文献的分析,发现传统的 MSM 光电器件具有制备简单、响应迅速、暗电流小等优点,但也存在光电流小、金属电极遮挡入射光、必须外加偏压等缺点。本文设计了一种 3D 结构背入射式 MSM 器件,通过 APSYS 仿真软件对器件电场的模拟、载流子迁移路径以及光电特性进行了相关仿真,证明了该器件通过 3D 结构改善了电场分布和载流子迁移路径、避免了正入射金属电极对入射光的遮挡,可以进一步改善光电器件性能。

1　仿真结构与理论模型

1.1　仿真结构

基于 AlN 的背入射式 3D 结构 MSM(FC-3DMSM)紫外探测器仿真模型如图 1 所示。在 AlN 材料中刻蚀出沟槽,并在沟槽内沉积金属电极,然后反置器件,使紫外光从背面入射,形成 FC-3DMSM 紫外探测器,其表面积为 400 μm×400 μm,衬底采用蓝宝石材料。在蓝宝石衬底上设置 1.5 μm 厚的 AlN 薄膜,掺杂浓度设为 1×10^{14} cm^{-3},并在 AlN 薄膜上设置了 Ni 对称金属电极。由于 3D-MSM 器件的金属电极被沉积在 AlN 材料上,背入射结构的优越性使得器件受光照射面积增大,同时 3D 结构可以对 AlN 材料中光生载流子的迁移路径进行优化并且在一定程度上改善器件内部的电场分布,进而达到增加器件的光电响应特性的目的。设定 AlN 材料禁带宽

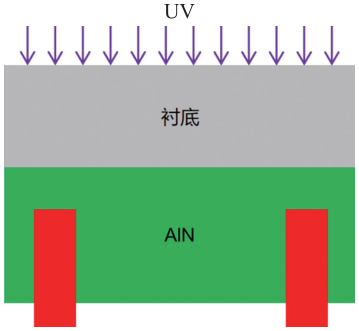


图 1　FC-3DMSM 紫外探测器结构示意图

度参数为 6.2 eV,入射光功率密度设为 5 μW,光生载流子寿命设为 10^{-8} s,电子迁移率设为 135 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$[16]。仿真过程中统一设定器件的电极间距为 15 μm,温度条件为室温 25 ℃。

1.2　理论模型

金属与半导体接触界面的势垒高度在一定程度上决定了 MSM 器件的光电性能。对于理想的 MS 接触,金属侧电子会向半导体侧转移,引发能带弯曲,直至费米能级相平[17],根据莫特模型,金属与半导体形成的势垒高度 $q\phi_{ns}$ 为

$$q\phi_{ns}=W_m-\chi \tag{1}$$

式中:W_m 为金属功函数(Ni 功函数为 5.1 eV),χ 为 AlN 材料的亲和势(一般为 0.6 eV)。

一般来说,MSM 器件暗电流和光电流理论上可以分别通过式(2)和式(3)计算得到:

$$I_d=AA^*\exp\left(-\frac{\varphi_b}{KT}\right)\left(\exp\frac{qV}{nKT}-1\right) \tag{2}$$

式中:A 为器件面积,A^* 为有效理查森常数,T 为测试温度,φ_b 为肖特基势垒高度,K 为半导体材料介电常数,q 为电子电荷量大小,V 为外加偏压大小;n 为本征载流子浓度。

$$I_p=AA^*\exp\left(-\frac{\varphi_b-\Delta\phi}{KT}\right)\left(\exp\frac{qV}{nKT}-1\right) \tag{3}$$

式中:$\Delta\phi$ 为由于光生载流子聚集电极接触面引起的肖特基势垒下降。

考虑到半导体表面态对接触势垒的影响,其影响势垒高度 φ_b 为:

$$\varphi_b=c_2(W_m-\chi)+(1-c_2)\left(\frac{E_g}{q}-\phi_0\right) \tag{4}$$

$$c_2=\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i+q^2\delta D_{it}} \tag{4-1}$$

$$D_{it}=\frac{(1-c_2)\varepsilon_i}{c_2\delta q^2} \tag{4-2}$$

$$\phi_0=\frac{E_g}{q}-\frac{c_2\chi+c_3}{1-c_2} \tag{4-3}$$

式中:$\varepsilon_i\approx\varepsilon_0$,$\delta$ 为界面层厚度,c_3 可以通过实验结果和最小二乘法直线拟合得到。在 MSM 器件仿真过程中,根据前面学者的研究成果,c_3 取经验值 0.52,在 FC-3DMSM 器件仿真过程中,采用刻蚀后金属电极与半导体接触面积正比关系和刻蚀深度正比关系函数对 c_3 进行设置。

$$c_3=0.52\times\frac{\text{MSM 电极接触面积}}{\text{3D 电极接触面积}}=0.52\times\frac{\text{电极宽度}}{\text{刻蚀深度}\times2+\text{电极宽度}} \tag{5}$$

这是因为半导体材料吸收系数 α 可以通过透过率 T 计算得到：

$$\alpha=\frac{\ln(T\%)}{d} \tag{6}$$

式中：d 为半导体材料厚度。

而频带延边光波入射半导体材料后，随着入射深度的增加，光波被吸收量为：

$$I=I_0[1-\exp(-\alpha Z)] \tag{7}$$

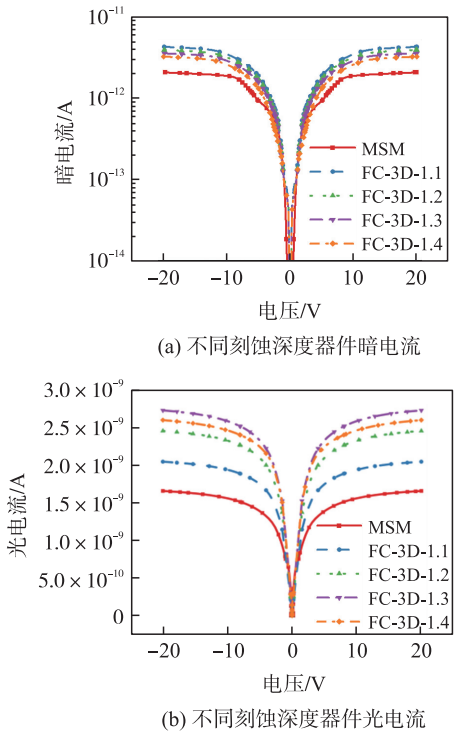
式中：I 为光波吸收量，I_0 为入射光波强度，Z 为光波入射半导体材料的深度。

根据式(7)可以看出，光波在入射深度为 $1/\alpha$ 时 63.6%的光波已经被吸收，入射深度为 $2/\alpha$ 时 86.5%的光波已经被吸收，入射深度为 $3/\alpha$ 时 95%的光波已经被吸收。通过 AlN 材料的透过率实验测试值计算得到对应 200 nm 波长的光吸收系数 α 为 5×10^4 cm^{-1}，当入射深度为 200 nm 时，光波被吸收 63.6%，当然除了光吸收量外，还有电场大小和载流子迁移路径对光电流的影响。

2 FC-3DMSM 紫外探测器仿真结果与分析

通过对背入射式 3DMSM 器件采用前述分析方法，考虑到 AlN 材料对光的吸收特性，针对背入射式 3DMSM 器件，设定了 1.1 μm、1.2 μm、1.3 μm 和 1.4 μm 四种刻蚀深度。图 2(a)展示了在施加 20 V 偏压条件下，FC-3DMSM 器件与传统的 MSM 器件暗电流的对比结果。

结果显示，相较于传统的 MSM 器件，FC-3DMSM 器件的暗电流明显更高。然而，在 20 V 偏压条件下，不同刻蚀深度的 FC-3DMSM 器件之间随着刻蚀深度的递增，器件的暗电流呈现出略微减小的趋势。这一现象可以从两个方面解释：一方面，刻蚀过程中器件表面可能产生了一些蚀刻缺陷，这些缺陷能够降低 MS 接触势垒高度，进而使器件在刻蚀后的暗电流有所上升；另一方面，随着刻蚀深度的增加，电极与 AlN 之间的接触面积也随之增大，这导致接触面上平均电场强度的降低，从而减小了器件的暗电流。暗电流的增加是因为刻蚀后，刻蚀表面悬挂键数量增加，导致与金属电极接触面势垒下降，根据式(2)求得其暗电流增加，对器件灵敏度和光响应度等性能具有一定的负面影响。但由于暗场下，半导体内的本征载流子较少，因此暗电流增量很小，与光电流增量、光响应度增量相比，可以忽略，因此背入射器件暗电流的增加对器件综合性能影响可以忽略。根据图 2(b)中展示的不同刻蚀深度下 FC-3DMSM 器件与传统 MSM 器件的光电流 I_L 特性



(a) 不同刻蚀深度器件暗电流

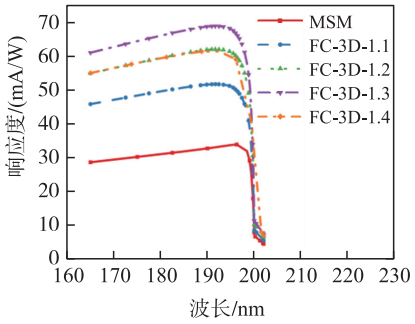
(b) 不同刻蚀深度器件光电流

图 2 不同刻蚀深度 FC-3DMSM 器件暗电流和光电流仿真分析结果

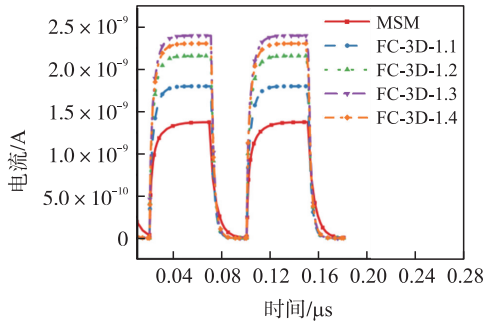
测试结果，可以观察到以下现象：在不同刻蚀深度下，FC-3DMSM 器件的光电流大小与传统 MSM 器件相比均呈现出明显的优势，且这些优势在不同刻蚀深度间基本保持一致。此外，不论刻蚀深度如何变化，所有器件的光电流均显示出明显的对称性。随着刻蚀深度的增加，器件的光电流呈现出轻微的下降趋势。这一现象是因为在光照射下，刻蚀处理改变了器件的电场分布，电极间分布逐渐成为电场分布的主导。这种电场分布的变化有效地提升了载流子的收集效率。在电场作用下，载流子更容易被导向电极并被收集，从而增强了光电流。另一方面，随着刻蚀深度的增加，电极与 AlN 之间的接触面积也随之增大，这导致接触面上平均电场强度的降低，从而减小了器件的暗电流。在刻蚀深度为 1.3 μm 时，FC-3DMSM 器件的光电流达到峰值。这是因为 FC-3DMSM 器件的背入射结构使得光照射面积增大，同时，刻蚀形成的沟槽中的金属电极能够高效地收集光生载流子。然而，由于 AlN 材料的光入射深度约为 300 nm，对于刻蚀深度为 1.4 μm 的 FC-3DMSM 器件，当器件本身的 AlN 材料的厚度仅为 1.5 μm 时，沉积的金属电极会对入射光产生一定的阻挡作用，刻蚀深度越大，这种阻挡作用越大。这种阻挡导致了刻蚀深度为 1.4 μm 的 FC-3DMSM 器件的光电流小于刻蚀深度为 1.3 μm 的 FC-3DMSM 器件。

图 3 展示了不同刻蚀深度 FC-3DMSM 器件的

光响应特性。具体而言,图 3(a)对比了不同刻蚀深度的 FC-3DMSM 器件与传统 MSM 器件的光响应度。



(a) 不同刻蚀深度器件响应度



(b) 不同刻蚀深度器件时间–光电响应

图 3　不同刻蚀深度器件的响应度和时间–光电响应仿真分析结果

从图 3 可以观察到,所有器件的光响应度均在 197 nm 波长处达到峰值,随后在 200 nm 附近下降,并且经过刻蚀处理后的 FC-3DMSM 器件的响应度呈现出明显的优势,具体对比来看,随着刻蚀深度的增加,器件的光响应度呈现出轻微的下降趋势,这一现象与光电流表现一致。图 3(b)展示了不同刻蚀深度 FC-3DMSM 器件与传统 MSM 器件在 0.04 ns 时间间隔下的时间光电响应,可以观察到,经过刻蚀处理的 FC-3DMSM 器件在稳态下的光响应电流相较于传统 MSM 器件展现处明显优势,这进一步证明了 FC-3DMSM 结构对于 MSM 器件光响应特性的优越性。

图 4 进一步展示了不同刻蚀深度器件在 2 V、5 V、8 V、10 V 偏压下的具体光响应时间(T_r)和弛豫时间(T_d)。结果表明,相较于传统 MSM 器件,经过刻蚀处理的 FC-3DMSM 器件在响应时间和弛豫时间方面均有所优化。这一现象可以从两个维度进行解释。一方面,通过刻蚀后沉积的电极,使得光生载流子的迁移路径集中在横向,进而有效提升了响应速度。然而,随着刻蚀深度的增加,电场强度逐渐减弱,这在一定程度上延长了响应时间。另一方面,刻蚀处理促进了光生载流子向电极的聚集。当电源关闭时,由于刻蚀作用,AlN 中残留的载流子数量显著减少,这直接促进了弛豫时间的缩短。

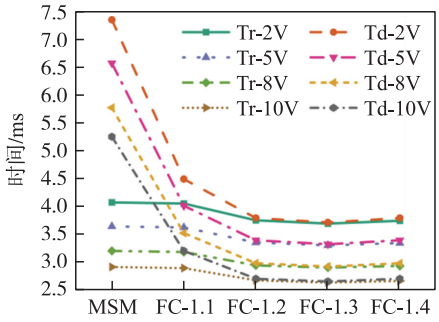
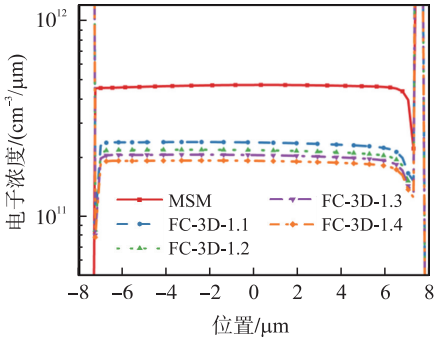


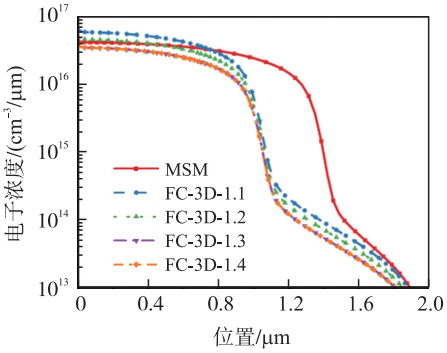
图 4　不同刻蚀深度器件的响应时间和弛豫时间仿真分析结果

图 5 展示了在光照和 8 V 偏压下,不同刻蚀深度的 FC-3DMSM 器件 AlN 中载流子的分布情况。仿真结果显示,随着刻蚀深度的逐渐加深,器件内部载流子浓度呈现出明显下降的趋势。这一现象为解释了刻蚀后的 FC-3DMSM 器件在相同正偏压下展现出更高的光电流,且随着刻蚀深度的增加,光电流轻微下降。原因在于光照射条件下,随着刻蚀深度的增加,更多的光生载流子能够被两端的金属电极有效捕获和收集,从而显著减少了残留在 AlN 体内的光生载流子数量,进而使得光电流增大。

施加于两电极间的等值外部驱动电压会因刻蚀深度的不同而产生强度各异的电场。在一定的载流



(a) 载流子浓度横向分布



(b) 载流子浓度纵向分布

图 5　不同刻蚀深度器件 AlN 内部载流子浓度仿真分析结果

子浓度条件下,电场强度的增加能够有效提升光生载流子的收集效率。图 6 展示了不同刻蚀深度的 MSM 器件电场强度的分布状况。可以观察到,电场主要集中在左端正电极下方及两电极间的表面区域。然而,经过刻蚀后,电极下方的电场强度显著降低,大部分电场转而集中在两电极之间,从而显著增强了该区域的电场强度。这种强电场的分布随着刻蚀深度的增加由 AlN 表面深入到其内部,逐渐拓展到 500 nm 深度。强电场转移至两电极间的过程,不仅增强了两电极间的电场强度,进而加快了光生载流子的迁移速度,使得两电极在载流子寿命内能捕获更多的光生载流子。而且,随着强电场在 AlN 中分布区域的扩大,使得强电场分布范围内的光生载流子在强电场的驱动下更容易被两端的电极捕获。此外,得益于背入射结构的优越性,无论是在电极正面还是背面产生的光生载流子,都更容易被电极收集。多方面的共同作用提升了光生载流子的收集效率,进而使得 FC-3DMSM 器件的光电特性相较于传统 MSM 器件展现出了优越的性能。

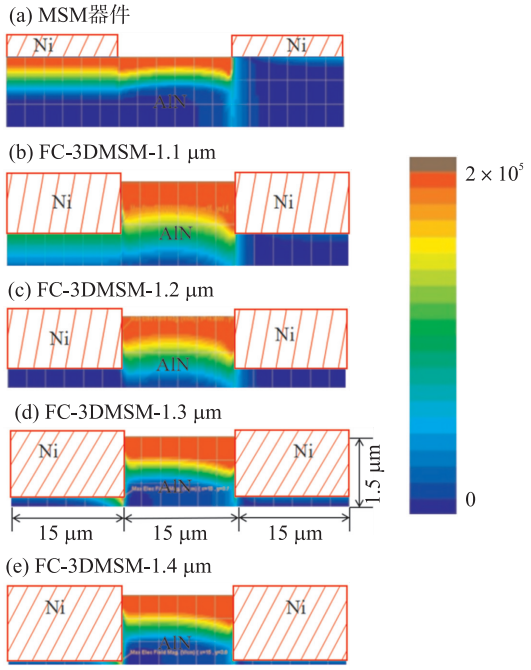


图 6 不同刻蚀深度器件电场分布仿真分析结果

3 结论

提出了背入射式 MSM 结构并设计了一种 AlN 基 FC-3DMSM 紫外探测器,通过改变 MSM 器件的刻蚀深度,利用 APSYS 仿真软件建立并分析了不同刻蚀深度 MSM 器件各性能参数对器件性能的影响规律。仿真结果表明,刻蚀后的 FC-3DMSM 器件的光电性能相较于传统 MSM 器件均显示出一定的性能提升。这是由于 3D 结构的引入增大了光照射面积,改变了 MSM 器件中光生载流子的迁移路径,显著增强了电极间电场强度,提升了光生载流子的收集效率,同时 FC-3DMSM 器件由于背入射结构进一步增大了光照射面积,其光电特性增加更加明显。

参考文献:

[1] Cheng Y,Ikku Y,Takenaka M,et al. Surface Leakage Reduction in MSM InGaAs Photodetector on III-V CMOS Photonics Platform[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2015,27(14):1569-1572.

[2] 仇鹏,刘恒,朱晓丽,等. Ⅲ族氮化物半导体及其合金的原子层沉积和应用[J]. 物理学报,2024,73(3):283-304.

[3] Huang C,Zhang H C,Sun H D. Ultraviolet Optoelectronic Devices Based on AlGaN-SiC Platform:Towards Monolithic Photonics Integration System[J]. Nano Energy,2020,77:105149.

[4] 李滔,戴小标. AlN/GaN 基背入射式金属-半导体-金属紫外探测器研究[M]. 北京:中国原子能出版社,2023:1-216.

[5] Monroy E,Calle F,Munoz E,et al. AlGaN metal-Semiconductor-Metal Photodiodes[J]. Applied Physics Letters,1999,74(22):3401-3403.

[6] Li J,Fan Z Y,Dahal R,et al. 200 nm Deep Ultraviolet Photodetectors Based on AlN[J]. Applied Physics Letters,2006,89(21):213510.

[7] 朱彦旭,谭张杨,王晓冬.ZnO NW 栅极 GaN HEMT 紫外光探测性能[J]. 电子学报,2023,51(9):2510-2516.

[8] Zhang Z H,Zhang Y H,Sun X W,et al. Hole Accelerator for III-Nitride Light-Emitting Diodes[M]//Feng Z C. Handbook for Solid-State Lighting and LEDs,Boca Raton,FL,USA:CRC Press,2017:557-570.

[9] Zhang Z H,Zhang Y H,Bi W G,et al. A Charge Inverter for III-Nitride Light-Emitting Diodes[J]. Applied Physics Letters,2016,108(13):133502.

[10] Zhang Z,Zhang Y,Bi W,et al. On the Hole Accelerator for III-Nitride Light-Emitting Diodes[J]. Applied Physics Letters,2016,108(15):071101.

[11] Zhang Z H,Zhang Y H,Demir H V,et al. Internal Quantum Efficiency for III-Nitride-Based Blue Light-Emitting Diodes[M]//Bi W G,Kuo H C,Ku P C,et al. Handbook of GaN Semiconductor Materials and Devices,Boca Raton,FL,USA:CRC Press,2017:433-453.

[12] Zhang Z H,Zhang Y H,Li H J,et al. On the Importance of the Polarity for GaN/InGaN Last Quantum Barriers in III-Nitride-Based Light-Emitting Diodes[J]. IEEE Photonics Journal,2016,8(6):8200307.

[13] Zhang Y, Zhang Z, Tan S, et al. Investigation of p-Type Depletion Doping for InGaN/GaN-Based Light-Emitting Diodes[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(3): 033506.

[14] Zhang Z, Zhang Y, Bi W, et al. On the Internal Quantum Efficiency for InGaN/GaN light-Emitting Diodes Grown on Insulating Substrates[J]. Physica Status Solidi A, 2016, 213(12): 3078-3102.

[15] Shishehchi S. Optical and Transport Properties of GaN and Its Lattice Matched Alloys[D]. Boston, MA, USA: Boston University, 2016.

[16] Chichibu S F, Onuma T, Hazu K, et al. Major Impacts of Point Defects and Impurities on the Carrier Recombination Dynamics in AlN[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(20): 201904.

[17] 房万年,李强,张启凡,等. 基于磁控溅射法生长 hBN 薄膜的 MSM 型真空紫外探测器[J]. 光子学报, 2024, 53(7): 23-32.

何映坤(2002—),男,汉族,河南驻马店人,在读研究生,主要研究方向:半导体器件仿真;

李　滔(1988—),男,湖南邵阳人,博士,副教授,主要研究方向:半导体材料与器件,litao_0210@163.com。