光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023112001

单边凹槽电极结构 MSM 型蓝光探测器的研究

黎　斌[1,2*]，张震华[2]，卫静婷[1,2]

（1. 广东开放大学(广东理工职业学院) 工程技术学院，广州 510091；
2. 中山大学 电子与信息工程学院 光电材料与技术国家重点实验室，广州 510006）

摘　要： 为提升 InGaN 基可见光探测器性能，制作并测试了基于 GaN/InGaN MQWs 外延材料的单边凹槽叉指电极 MSM 结构蓝光光电二极管。凹槽电极器件的 *I-V* 特性测试结果显示，相较于传统平面电极器件，随着偏压增加，器件暗电流越小且越趋于平缓，而光电流越大；光谱响应率测试显示，器件截止带边都位于 490 nm 附近，凹槽电极器件带边处拒绝比高于平面电极器件 1 个量级。当偏压为 5 V 时，凹槽电极器件响应率为 0.034 6 A/W@480 nm，对应外量子效率为 8.94%，高于平面电极器件。器件性能提升的原因是单边凹槽电极结构有效改善了内建电场的分布，从而抑制了表面传导漏电流，使得器件暗电流更小且更有利于电极收集光生载流子，提升了响应率。

关键词： 蓝光探测器；MSM；GaN/InGaN 多重量子阱；单边凹槽电极；内建电场分布

中图分类号： TN31　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0410－05

MSM Blue-Light Photodetector with Unilateral Recessed Electrode Structure

LI Bin[1,2], ZHANG Zhenhua[2], WEI Jingting[1,2]

(1. Engineering Technology Department, The Open University of Guangdong and Technology of Guangdong Polytechnic Institute, Guangzhou 510091, CHN; 2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: To improve the performance of InGaN-based visible light detectors, a unilateral recessed interdigital electrode MSM-type blue light photodiode based on a GaN/InGaN MQWs epitaxial material is fabricated and measured. The *I-V* characteristic measurement results of the device show that, compared with traditional planar electrode devices, recessed electrode devices have smaller and flatter dark currents and larger photocurrents with increasing bias. Spectral response measurements show that the cutoff band edge of the device is located near 490 nm, and the rejection ratio at the band edge of the recessed electrode device is one order of magnitude higher than that of the planar electrode device. At a bias voltage of 5 V, the responsivity of the recessed electrode device is 0.034 6 A/W @ 480 nm, corresponding to an external quantum efficiency of 8.94%, that is higher than that of the planar electrode device. The improvement in device performance is attributed to the effective suppression of the surface conduction leakage current and the improved distribution of the built-in electric field achieved by the unilateral recessed electrode structure. This results in a reduced dark current in the device and enhances the collection of photogenerated carriers by the electrodes, thereby increasing the responsivity.

Key words: blue light detector; MSM; GaN/InGaN MQWs; unilateral recessed electrodes; built-in electric field distribution

收稿日期：2023－11－20.
基金项目：广东开放大学(广东理工职业学院)校级重点科研项目(ZD1905).
* **通信作者：**黎　斌

0　引言

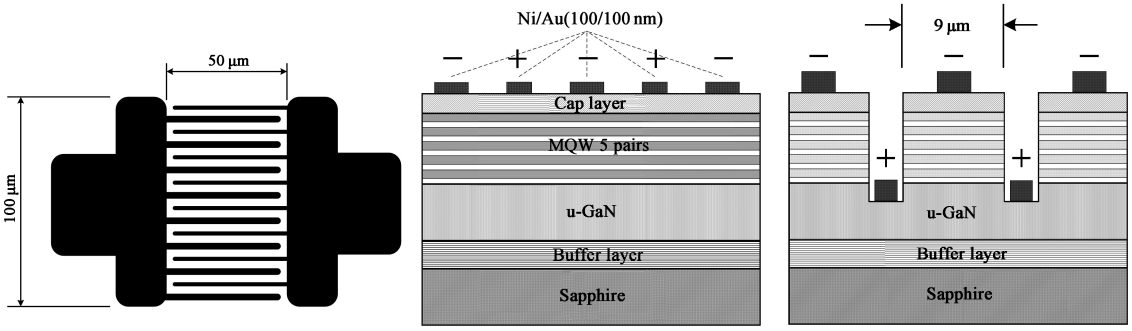
当前许多应用如可见光通信、生物光子研究、荧光光谱研究和碳氢化合物燃烧控制等[1-3]，都需要工作在可见光波段的高效光电探测器。在可见光探测方面，$In_xGa_{1-x}N(0<x<1)$三元合金是一种非常有前景的半导体材料。随着铟(In)组分的不同，$In_xGa_{1-x}N$ 半导体的直接禁带带隙可以从 0.7～3.4 eV 连续可调，其可调范围覆盖了整个可见光波段。到目前为止，InGaN 体基的光电探测器仍然面临着大漏电流和较差的光谱响应特性的情况，原因是 InGaN 外延层存在高密度点缺陷、线缺陷和相分离等问题[4-6]，而且这些问题随着 In 组分和外延层的厚度增大而变得愈加严重[7]。

采用 GaN/InGaN 多重量子阱(Multiple Quantum Wells，MQWs)结构可较好地规避高 In 组分和厚 InGaN 外延层所面临的高缺陷密度和相分离等问题。受益于早期对基于 GaN/InGaN MQWs 结构蓝绿光 LED 的研究，许多基于量子阱结构外延材料的光电探测器已被报道，例如 MS 结构光电二极管[8]、p-i-n 光电二极管[9-10]、MSM 结构光电二极管[11]和 MIS 结构光电二极管[12]。在这些不同结构的光电二极管中，MSM 结构光电二极管具有制作简单、响应速度快和器件工艺兼容场效应晶体管等优点。尽管如此，基于 GaN/InGaN MQWs 结构外延材料的 MSM 型可见光探测器依然存在较大的暗电流、量子效率低和探测带边靠近紫外波段等问题，本文基于蓝光 GaN/InGaN MQWs 外延材料，制作了具有单边凹槽叉指电极的 MSM 结构蓝光光电二极管。对比传统平面电极的 MSM 结构光电二极管，这种结构的光电二极管具有更低的暗电流和更优异的光谱响应特性。

1　器件制作

用于制作 MSM 结构光电二极管的半导体材料采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底(0001)面上制备 GaN/InGaN MQWs 外延层。在生长 GaN/InGaN MQWs 结构之前，先在温度为 530 ℃下生长一层厚度为 25 nm 的 GaN 成核层，接着在 1 050 ℃下生长一层厚度为 4 μm 的非有意掺杂 GaN 外延层，最后生长具有 5 个周期的 GaN/InGaN MQWs 结构外延层和厚度为 35 nm 的非有意掺杂 GaN 覆盖层，其中量子阱层和量子势垒层分别在 715 和 815 ℃下生长。生长完 InGaN 量子阱层后，在温度升高到生长 GaN 势垒层之前，先生长厚度为 1 nm 的 GaN 保护层，详细的外延生长过程请参考文献[13]。经过测量，InGaN 量子阱厚度为 2.62 nm，量子势垒层厚度为 17.05 nm，InGaN 量子阱层中 In 组分为 19.2%。

器件叉指电极图案使用标准光刻技术制作，其中电极的有源区面积为 50 μm×100 μm，叉指长度为 50 μm，指间距为 3.5 μm，其中一边叉指宽度为 3 μm，另一边宽度为 2 μm，如图 1(a)所示。然后使用电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma，ICP)刻蚀用来放置单边叉指电极的凹槽。凹槽的深度为 180 nm，宽度为 3 μm，两个凹槽之间的间距为 9 μm。为了去除 ICP 刻蚀带来的损伤，将刻蚀后样品浸入到沸腾的王水中 80 s，然后使用去离子水清洗干净并用氮气吹干。接着使用光刻、电子束蒸发方法，在外延材料表面和凹槽内蒸镀 Ni(10 nm)/Au(100 nm)肖特基接触电极。单边凹槽电极 MSM 结构光电二极管的横截面如图 1(c)所示。这种结构与之前文献[14]所报道的不同，因为之前报道具有凹槽电极的器件，作为电极的金属是填充满整个凹槽。为了对比也制作了传统的平面电极 MSM 结构光电二极管，其结构如图 1(b)所示。



(a) 叉指电极示意图　　(b) 平面电极　　(c) 凹槽电极

图 1　叉指电极示意图和平面电极、凹槽电极的 MSM 结构光电二极管横截面结构示意图

在测试和分析器件特性时，偏置电压的正负如图 1(b)和(c)所示。

2 测试与分析

器件的 I-V 特性使用 Keithley-4200 半导体参数分析仪在室温下测试得到，测试器件的光电流时使用峰值波长为 410 nm 的紫光 LED 作为光源。如图 2 所示，对比传统的平面电极 MSM 型光电二极管，随着电压的增加，凹槽电极 MSM 型光电二极管暗电流更低和更平缓。根据热电子发射模型[15]，得到凹槽电极和平面电极器件的理想因子分别是 1.05 和 1.06。

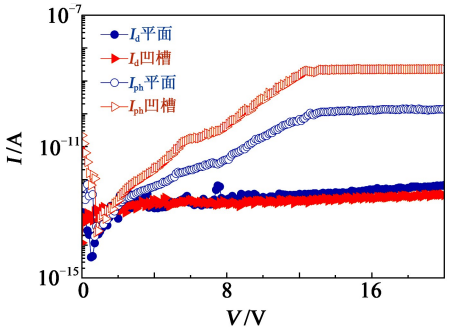


图 2 凹槽和平面叉指电极器件的暗电流 I_d、光电流 I_{ph} 特性

当偏压为 20 V 时，平面电极和凹槽电极器件的暗电流分别为 6.74×10^{-13} A 和 3.30×10^{-13} A。凹槽电极器件的暗电流比平面电极器件小 51%，主要原因是在凹槽电极结构中，电子表面传导的路径在凹槽处被打断，且凹槽侧壁处的缺陷态与原生的表面态有较大的差异，使得电子难以越过能级差进行传导，从而抑制了器件横向表面漏电流[16-18]。此外凹槽电极结构可能也减小了内建电场在横向表面的分布，进一步降低了器件表面漏电流。当偏置电压小于 5 V 时，平面电极器件的暗电流反而小于凹槽电极器件的暗电流，原因是制作凹槽时使用 ICP 干法刻蚀工艺会给外延材料带来额外的表面缺陷，导致器件的暗电流会增大[19]。在蓝光 LED 照射下，器件光电流随着偏压增加而增大，凹槽电极器件的光电流大于平面电极器件的光电流；当偏置电压大于 13 V 时，两种电极结构器件的光电流都趋于饱和。光电流随着偏置电压的增大而增加，是由于偏置电压扩大了器件表面耗尽区宽度并增强了内建电场强度，使得更多在耗尽区内的 InGaN 量子阱层中产生的光生载流子被内建电场分离，而显示出光电流随着偏压的增加而增加。在偏压为 20 V 下，平面电极器件和凹槽电极器件的光电流分别为 1.73×10^{-10} A 和 2.30×10^{-9} A。凹槽电极位于量子阱层之下，因而在紫光照射下，其产生的反向光电流更小，这使得凹槽电极器件总的光电流会更大。在偏压为 13 V 下，凹槽电极器件和平面电极器件的光电流和暗电流之比分别为 7.7×10^{3} 和 3.2×10^{2}，这是凹槽电极器件的暗电流更小和光电流更大共同所致。

器件光谱响应特性使用了卤素灯和氙弧灯组成的光源，配备 1 200 线/mm 直纹光栅的单色仪和光学斩波器进行测量，同时采用硅光电探测器对入射光功率进行标定。图 3 为两种器件在偏压为 5 V 下的光谱响应特性数据。两种结构的 MSM 型光电二极管都具有陡峭的吸收带边，且其内的光谱响应变化平缓。两种结构器件的响应带边大约位于 490 nm。在 480 nm 处，凹槽电极与平面电极器件的光谱响应率分别为 0.034 6 和 0.013 7 A/W，对应的外量子效率（External Quantum Efficiency，EQE）为 8.94%和 3.54%。凹槽电极器件的拒绝比(480/520 nm)超过 2 个数量级，高于平面电极器件 1 个量级。图 3 中插图展示了在入射光为 460 nm 照射下，光谱响应率随着偏压增加而增大的特性。相较于平面电极器件，凹槽电极器件的光谱响应率增幅更大。

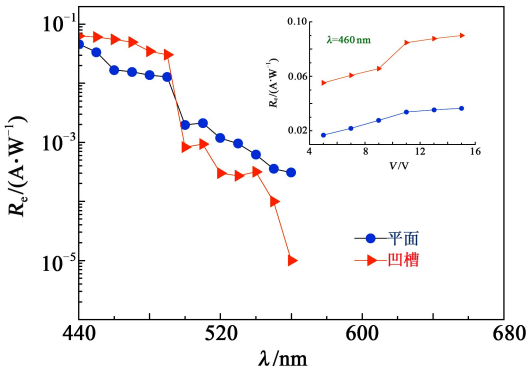


图 3 在 5 V 偏压下，平面电极和凹槽电极器件光谱响应特性曲线；插图中为两个器件的在入射光波长为 460 nm 照射下，光谱响应率随偏压变化而变化的特性曲线

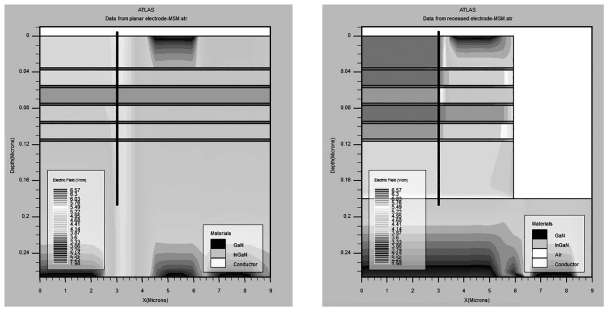
结合半导体材料 GaN/InGaN MQWs 和单边凹槽电极器件的结构，凹槽电极器件的响应率特性更优秀是由于：(1)MSM 结构光电二极管总的光电流是器件两个电极局部光电流之差。入射光为可见光时，只有 InGaN 量子阱层会对入射光吸收，凹槽电极器件由于其阳极下没有 InGaN 层，相当于阳极被短路；而平面电极器件中阴极光电流和阳极光电流则相互抵消大部分，所以凹槽电极器件的光电流

会大于平面电极器件的光电流。(2)凹槽电极器件结构有利于底层 InGaN 量子阱中光生载流子的收集，因为底层 InGaN 量子阱中光生载流子被凹槽电极收集前所经过的路径更短，更易收集；(3)凹槽电极器件的内建电场更均匀，更有利于分离入射光所产生的光生载流子。响应带边外，由于凹槽电极器件内建电场的分布使得沿器件表面分布的电场强度较小和表面二维变程跃迁漏电流的抑制，减小了器件表面漏电流，提升了凹槽电极器件的拒绝比。

为了更进一步研究凹槽电极 MSM 结构光电二极管性能改善的原因，实验使用商业软件 Silvaco (ATLAS)模拟了器件内部电场的分布。在模拟中，设定 Ni 肖特基接触电极的功函数为 5.6 eV，而在凹槽中的肖特基接触电极的功函数比平面上的电极功函数小约 200 meV，这是考虑到 ICP 刻蚀会引入缺陷导致接触势垒降低。GaN/InGaN 界面处导带的带阶差设定为两种材料带隙之差的 65%。所用到的物理模型有：Fermi-Dirac 载流子统计模型(Fermi)、浓度依赖迁移率模型(Conmob)、平行电场依赖迁移率模型(Fldmob)、俄歇复合模型(Auger)、Shockley-Read-Hall 复合模型(SRH)、能带变窄模型(BGN)、Wurtzite 结构的 $k \cdot p$ 模型(WZ.KP)、载流子飘移和扩散模型(K.P)和极化模型(Calc.Strain，Polarization)等。其中自发极化和压电极化的比例因子 Polar.Scale 设为 0.35，一些 InGaN 材料的参数结合 GaN 和 InN 材料的相关参数可使用 Vegards 定理近似得到。

图 4(a)为在偏压 13 V 下，两种器件内部的电场强度二维分布图，电场强度采用对数形式表示。当电场强度大于 10^5 V/cm 则认为是足以分离和收集光生载流子[20]。从图中可知，两种器件内部电场分布在阴极下的电场强度和分布范围都大于阳极，电场强度的峰值都出现在 InGaN 量子阱中。对比平面电极器件，凹槽电极器件在 GaN 势垒层中的电场强度更大，在阴极下电场强度分布更均匀，而在阳极下的电场强度则更小。另外，平面电极器件叉指电极之间且靠近表面部分的电场强度强于凹槽电极相同位置的电场强度，这也与之前暗电流数据分析一致。

在位于两种器件的阴极边沿(即 $x=3$ μm)、垂直方向(图 4 中黑色垂直线所示)的电场强度分布如图 5。凹槽电极器件的电场强度在势垒层和量子阱层中较为接近，整体分布较为均匀。在平面电极器件中，其势垒层和量子阱中电场强度差异较大，且势垒层中电场强度小于凹槽电极器件同样位置的电场强度(平均电场强度仅为凹槽电极器件的 28.08%)。可见光信号在器件的量子阱层中被吸收，产生的光生载流子需要越过势垒层才被电极收集。由于 InGaN 量子阱层和 GaN 势垒层的导带带阶差距较大，对比平面电极器件，凹槽电极器件在势垒层中更强的电场中，有助于光生载流子的收集，且其光电流更大、响应率更高。两种电极结构的器件内部电场分布情况与前面光电流和响应特性数据分析的结论一致。



(a) 平面电极　　(b) 凹槽电极

图 4　在偏压为 13 V 下，电极器件内部电场分布的横截面图

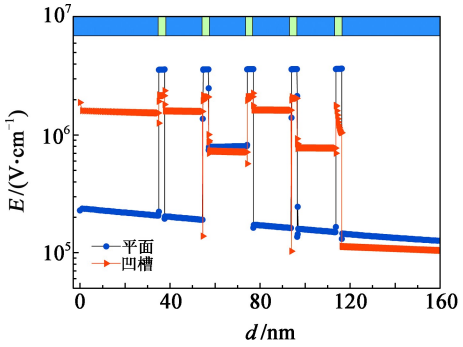


图 5　平面、凹槽电极器件阴极边沿(即 $x=3$ μm)垂直方向的电场强度分布

3　结论

本文制作并测试了基于 GaN/InGaN MQWs 材料的两种不同结构电极 MSM 型可见光光电二极管。对比传统平面电极 MSM 型光电二极管，随着偏置电压的增加，单边凹槽电极 MSM 型光电二极管的暗电流更小且增长更平缓，光电流更大。在偏压为 20 V 下，凹槽电极器件的暗电流为 3.30×10^{-13} A，比平面电极器件暗电流小 51%；在紫光照射下，凹槽电极器件的光电流为 2.30×10^{-9} A，比平面电极器件光电流大 12.3 倍。光谱响应率测试显示，两种结构电极器件的截止带边都位于 490 nm 附近，凹

槽电极器件带边处拒绝比超过 2 个数量级，比平面电极器件高 1 个量级。在偏压为 5 V 下，凹槽电极器件光谱响应在 480 nm 下为 0.034 6 A/W，对应的 EQE 为 8.94%，是平面电极器件 EQE 的 2.5 倍。凹槽电极器件的性能提升的原因是单边凹槽电极结构抑制了表面传导漏电流和改善了器件内部电场强度的分布。但是由于采用的是 LED 器件的 GaN/InGaN MQWs 结构，GaN 势垒层较厚和 InGaN 量子阱层数量较少，对比使用 InGaN 体基材料的器件，凹槽电极器件的响应度还是偏小。在后续研究中减小 GaN 势垒层厚度和增加 GaN/InGaN 量子阱的周期数将有助于提升器件响应度。

参考文献：

[1] Omnès F, Monroy E , Muoz E ,et al. Wide bandgap UV photodetectors: a short review of devices and applications[J]. Proc. SPIE, 2007, 6473: 6473E.

[2] Razeghi M. Ⅲ-nitride optoelectronic devices: from ultraviolet toward terahertz[J]. IEEE Photonics J., 2011, 3(2): 263-267.

[3] Komine T, Nakagawa M. Fundamental Analysis for Visible-light Communication System Using LED Lights [M]. American Institute of Physics, 2004.

[4] Pantzas K, Patriarche G, Troadec D, et al. Role of compositional fluctuations and their suppression on the strain and luminescence of InGaN alloys[J]. J. of Appl. Phys., 2015, 117(5): 055705.

[5] Pantha B N, Wang H, Khan N, et al. Origin of background electron concentration in $In_xGa_{1-x}N$ alloys[J]. Phys. Rev. B, 2011, 84(7): 075327.

[6] Poblenz C, Mates T, Craven M, et al. Impurity incorporation in InGaN grown by RF plasma-assisted molecular beam epitaxy[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 81(15): 2767-2769.

[7] Li C, Wu F, Li S, et al. Influence of indium cluster on the high and constant background electron density in ternary $In_xGa_{1-x}N$ alloys[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(6): 062102.

[8] Li B, Huang S-J, Wang H-L, et al. Performance improvement of InGaN/GaN multiple quantum well visible-light photodiodes by optimizing TEGa flow[J]. Chinese Phys. B, 2017(08): 427-432.

[9] Pereiro J, Rivera C, Navarro A, et al. Optimization of InGaN-GaN MQW photodetector structures for high-responsivity performance [J]. IEEE J. of Quantum Electronics, 2009, 45(6): 617-622.

[10] Lv Z, Guo Y, Zhang S, et al. Polarization engineered InGaN/GaN visible-light photodiodes featuring high responsivity, bandpass response, and high speed[J]. J. of Mater. Chem. C, 2021, 9(36): 12273-12280.

[11] Huang Z, Weng W, Chang S, et al. InGaN/GaN multiquantum-well metal-semiconductor-metal photodetectors with beta-cap layers[J]. IEEE Sensors J., 2013, 13(4): 1187-1191.

[12] Chang P C, Chen C H, Chang S J, et al. InGaN/GaN multi-quantum well metal-insulator semiconductor photodetectors with photo-CVD SiO_2 layers[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2004, 43(4S): 2008-2010.

[13] Huang S, Fan B, Xian Y, et al. Influence of the TEGa flow on the optical and structural properties of InGaN/GaN multiple quantum wells grown by MOCVD[J]. J. of Crystal Growth, 2011, 314(1): 202-206.

[14] Yu C L, Chen C H, Chang S J, et al. In/sub0.37/Ga/sub 0.63/N metal-semiconductor-metal photodetectors with recessed electrodes [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(4): 875-877.

[15] Averine S, Chan Y C, Lam Y L. Evaluation of Schottky contact parameters in metal-semiconductor-metal photodiode structures[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(2): 274.

[16] Feng S W, Cheng Y C, Chung Y Y, et al. Impact of localized states on the recombination dynamics in InGaN/GaN quantum well structures[J]. J. of Appl. Phys., 2002, 92(8): 4441-4441.

[17] Chen D J, Liu B, Lu H, et al. Improved performances of InGaN Schottky photodetectors by inducing a thin insulator layer and mesa process[J]. IEEE Electron Device Lett., 2009, 30(6): 605-607.

[18] Li B, Zhang Z, Zhang X, et al. InGaN-based MSM visible light photodiodes with recessed anode[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 31(17): 1409-1472.

[19] Shul R J, Zhang L, Baca A G, et al. Inductively coupled plasma-induced etch damage of GaN p-n junctions[J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 2000, 18(4): 1139-1143.

[20] Duboz J Y, Reverchon J L, Adam D, et al. Submicron metal-semiconductor-metal ultraviolet detectors based on AlGaN grown on silicon: Results and simulation[J]. J. of Appl. Phys., 2002, 92(9): 5602-5604.

作者简介：

黎　斌(1982—)，男，广东省梅州市人，博士，讲师，从事基于宽禁带半导体材料光电探测器方面的研究。