

GaN 基紫外探测器发展概况

刘万金, 胡小燕, 喻松林
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:基于宽禁带半导体材料的 GaN 基紫外探测器由于具有探测波长可调、工艺兼容性好、结构可多型化等优点,已成为近年来的研究热点。介绍了四种不同结构类型的紫外探测器:光导型、肖特基势垒、金属-半导体-金属、p-i-n 结,并回顾了 GaN 基紫外探测器的研究历程。

关键词:GaN; 紫外探测器; 光电二极管

中图分类号:TN23; TN36 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.002

Development overview of GaN-based ultraviolet detector

LIU Wan-jin, HU Xiao-yan, YU Song-lin
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: GaN-based wide bandgap semiconductor ultraviolet detector has become a research hotspot in recent years due to its many advantages such as adjustable response wavelength, good process compatibility and diverse structure applicability. This paper introduces four different types of UV detector: photoconductor, Schottky, MSM and p-i-n. The history of GaN-based ultraviolet detector is reviewed and discussed.

Key words: GaN; UV detector; photodiode

1 引言

紫外辐射的波长范围在 0.01 ~ 0.4 μm 之间,一般分为近、中、远、极远紫外。各种紫外光源中,太阳是最强的紫外辐射源。不同波长的紫外线大气穿透率不同。1999 年,美国空军通过实验得出波长 $\lambda < 280 \text{ nm}$ 的紫外线在近地大气中几乎不存在,所以把波长 $\lambda < 280 \text{ nm}$ 的紫外波段称为日盲区^[1]。300 ~ 400 nm 波段,穿透率高,最终可以到达地面,称这一波段为大气紫外窗口。

军用紫外探测技术大多基于近地大气中“日盲区”和大气层中“紫外窗口”的基础上。利用导弹尾焰在日盲紫外波段的辐射可对其进行告警探测;利用高空大气层在中紫外区背景的均匀、简单特性,可进行天基紫外预警。在远紫外区,地面或近地面的飞机等空中目标挡住了大气散射的太阳紫外辐射,因而在均匀的紫外背景上形成一个“暗点”,可藉此进行探测或制导。

目前紫外探测器还主要以光电倍增管和硅二极管为主。由于需要附带昂贵的滤光片、工作电压高、体积笨重且效率较低等原因,限制了日盲型紫外探测器的大规模应用。

随着微电子技术和半导体材料学的发展,近年来,用宽禁带半导体材料实现对紫外辐射探测的相关研究得到了很大的关注。宽禁带半导体包括 III 族氮化物、宽禁带 II - VI 族、金刚石、SiC 材料等。对于日盲应用而言,近年来较受关注的是 III 族氮化物(特别是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, 其中 x 为 Al 组分)。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 可以看成是 GaN 和 AlN 的化合物,物理化学性质稳定,其禁带宽度可以从 GaN ($x=0$) 的 3.4 eV 连续变化到 AlN ($x=1$) 的 6.2 eV,对应的截止波长的波长范围是 0.2 ~ 0.365 μm 。对于日盲型紫外探测器,

作者简介:刘万金(1986-),男,硕士研究生,主要从事焦平面读出电路设计。E-mail:hfydx@163.com

收稿日期:2012-03-01;修订日期:2012-03-13

截止波长 $\lambda_{\text{cutoff}} < 0.28 \mu\text{m}$, 可计算出相应的铝组分 x 需要达到 0.38 以上。

2 GaN 基紫外探测器基本类型与性能参数

根据基本工作方式不同, 可将半导体探测器分为光电导探测器和光伏探测器。根据内建电场形成结势垒的不同, 光伏型探测器又可分为肖特基势垒 (Schottky barrier)、金属-半导体-金属 (MSM) 和 $p-i-n$ 结等形式。

2.1 光电导探测器

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 光电导探测器的基本原理是能量大于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 禁带宽度 (随 x 变化) 的光子作用于半导体薄膜上, 由于本征吸收和杂质吸收, 产生非平衡光生载流子, 引起 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 半导体的电导率发生变化。在外加电压作用下, 在探测器输出回路中产生光电流或光电压, 基本结构如图 1 所示。

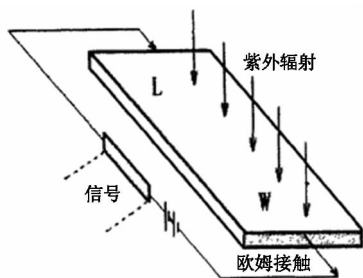


图 1 光电导型探测器基本结构

GaN 基光电导型探测器结构简单、工艺容易, 相比于光伏探测器, 它的一个主要优点是内部光电子增益比较高, 一般情况下其内部增益都在 100 A/W 以上。但其响应速度慢, 一般都在毫秒量级, 光响应与入射光间存在非线性变化关系、紫外/可见光响应比小, 目前研究的较少。

2.2 肖特基势垒光电二极管

肖特基器件典型结构如图 2 所示。图中在缓冲层上添加 n 型重掺杂 GaN 是为了能形成更好的欧姆接触, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 是吸收层, 其中铝组分 x 的大小决定了长波方向的截止波长。

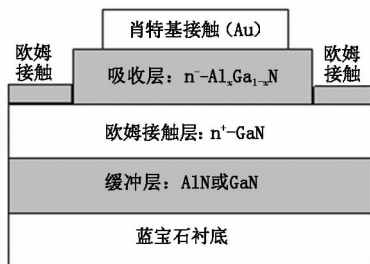


图 2 AlGaIn 肖特基型紫外探测器

肖特基器件响应速度快, 响应时间一般都在纳秒量级, 响应率一般约为 0.1 ~ 1 A/W , 同时肖特基

器件还具有结构制备简单、具有较高的紫外/可见光响应比 ($10^4 \sim 10^5$) 等优势。但这种结构需要制备欧姆接触, 目前形成良好的欧姆接触仍面临一些困难。

2.3 MSM 型光电二极管

1985 年, 德国半导体电子研究所率先提出了横向结构叉指状电极的肖特基光电二极管^[2], 即 MSM (金属-半导体-金属) 结构。典型的 MSM 肖特基势垒器件结构如图 3 所示, 在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄层上淀积叉指状的金属电极, 叉指间隙作光敏面。作用在两个肖特基耗尽区上的电场分离电子空穴对, 形成电流。

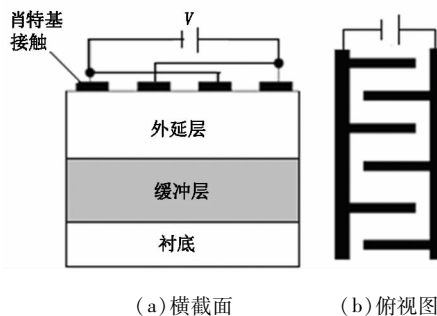


图 3 MSM 型紫外探测器结构横截面和俯视图

MSM 结构工艺简单, 只需要通过蚀刻、蒸发、剥离等技术将电极做出叉指状即可, 只需要一步光刻工艺, 而且与 FET 工艺完全兼容。MSM 光伏器件横向电容较小, 响应速度快, 响应时间可以达到 10^2 ps , 对应很高的带宽, 紫外/可见光响应比可达到 10^5 , 这种器件的主要缺点是增益比较低, 光响应率一般都低于 1 A/W 。

2.4 $p-i-n$ 型光电二极管

$p-i-n$ 结结构是目前最常用的光电二极管类型, 其典型结构如图 4 所示, 一般在蓝宝石衬底上用 MOCVD 或 MBE 生长制造, 背面光照或正面光照均可。

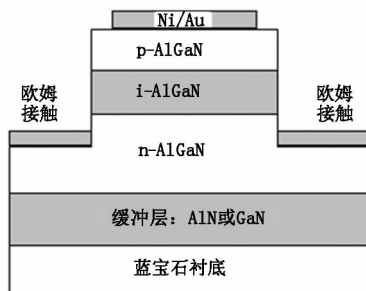


图 4 AlGaIn $p-i-n$ 型紫外探测器

$p-i-n$ 结的制造工艺成熟, 与半导体平面工艺相容, 器件工作偏压低, 输入阻抗高, 光响应与入射光线性关系好, 光响应率一般为 0.2 A/W , 紫外/可见光响应比大于 10^4 , 响应时间随偏压变化而

变化,零偏压下,响应时间为10~100 ns。GaN的p-i-n结构受p型材料质量的限制(p型掺杂产生高位错密度从而降低了载流子扩散长度),从而影响了光响应率和响应速度。

3 GaN基紫外探测器研究历程

整个GaN基紫外探测器的研究历程,大致分为四个阶段:第一阶段,探索如何生长质量较好的GaN外延层;第二阶段,利用GaN和中低Al组分的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料研制不同类型的紫外探测器,这一时期器件性能较差;第三阶段主要集中在用高Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料($x > 0.38$)研制日盲型紫外探测器;第四阶段主要是探索制造高性能日盲器件并藉此生产实用化的二维日盲焦平面阵列。

3.1 第一阶段

20世纪70年代,科研人员就开始研究GaN的光电导特性。随后十几年时间里,GaN基光电子器件研究一直受困于两大难题:没有合适的单晶衬底材料(蓝宝石衬底与GaN的晶格失配度很高);无法实现GaN的p型掺杂。

直到20世纪80年代后期,这两大难题才得到解决。1986年科研人员首次发现采用低温生长AlN缓冲层可以大大提高GaN外延膜的质量^[3]。1989年,科研人员利用低能电子束辐照工艺对GaN样品掺杂Mg,实现了样品表面的p型化^[4]。1992年,科研人员又利用氮气作为保护气,采用热退火处理工艺对GaN样品掺杂Mg,得到了高质量的p型GaN晶体。至此,对GaN及其合金 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的研究热潮开始在世界范围内蓬勃发展起来。

3.2 第二阶段

1992年,M. Al. Khan等人^[5]研制成功世界上第一个GaN基光导型紫外探测器,他们用MOCVD技术在蓝宝石(Al_2O_3)衬底上沉积AlN缓冲层,然后外延GaN吸收层。波长在200~365 nm范围内,器件光谱响应基本保持恒定,5 V偏压下,峰值响应度1000 A/W,响应时间1 ms。1993年,M. Al Khan等人^[6]又利用p型GaN薄膜研制出肖特基势垒光电二极管,相比他们之前研制的光导型器件,肖特基势垒器件的响应速度大幅提高,响应时间大约为1 ns。1995年,M. Al Khan小组^[7]报道了pn结型光电二极管,但是器件的性能很差,峰值响应度约为0.09 A/W,响应时间3 ms。为提高pn结型光电二极管的响应度和响应时间,一般在p区与n区间添加轻掺杂的近本征区,即形成pin结光电探测器。

3.3 第三阶段

20世纪90年代中后期,科研人员开始试验高铝组分($x > 0.38$)的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 。1996年,D. Walker小组^[8]首次实现了截止波长进入日盲区的AlGaN基光电二极管,他们用LP-MOCVD方法在蓝宝石(Al_2O_3)衬底上生长缓冲层,接着在缓冲层上生长了0.5~1.5 μm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$,其中Al的含量分别为 $x=0, x=0.21, x=0.34, x=0.50$,最后一个Al组分对应的截止波长处于日盲区内,如图5所示。器件的性能较差,在零偏压下 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 峰值响应率只有 2.8×10^{-6} A/W,这可能是由于高铝组分使器件中载流子寿命减小。随后不久,B. W. Lim等人在200 Å的AlN缓冲层上生长出0.5 μm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层,其中Al的含量分别为 $x=0.05, x=0.46, x=0.55, x=0.61$,后三个对应的截止波长也进入了日盲区^[9]。2000年,T. Li等人^[10]报道了MSM结构的GaN基日盲紫外光电二极管,利用MOCVD工艺在蓝宝石衬底上外延GaN缓冲层和 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 吸收层,用Ti/Pt做肖特基接触叉指电极,叉指宽2 μm ,间距8 μm ,剖面原理图如图6所示。12 V偏压下暗电流低于10 fA,90 V偏压下,峰值响应率107 mA/W,应时间约为10 μs ,估算的探测率为 3.3×10^{10} $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。J. Y. Duboz等人^[11]为了进一步提高探测器光响应率和光谱选择性,缩短了MSM结构叉指间距,并做了对比试验,测试结果表明减小叉指间距有利于提高探测器的响应率。

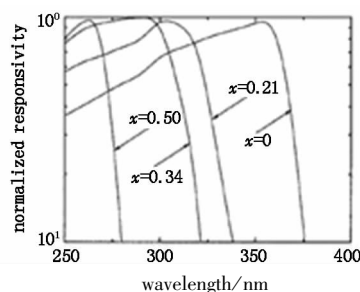


图5 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的光谱响应率

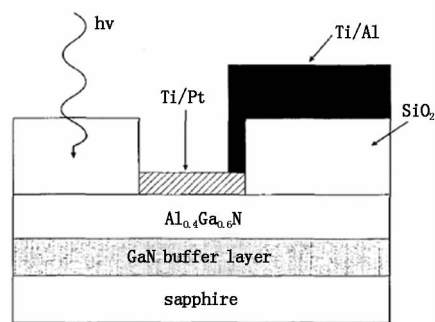


图6 二极管横截面原理图

3.4 第四阶段

进入新世纪,高铝组分的日盲紫外光电二极管性能不断提升。D. Walker 等人^[12]研制了 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ p-i-n 型光电二极管,实验设计了两组不同的焊接层:一组 Ni/Au(400 Å/1200 Å),另一组为半透明的 Ni/Au(30 Å/10 Å),测试表明使用半透明的 Ni/Au 焊接层可以极大地提高器件的光谱响应率,如图 7 所示。-5 V 偏压下的峰值响应率为 0.11 A/W(232 nm),探测率大于 $2.3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。N. Biyikli 等人^[13]用 MOCVD 的方法在蓝宝石衬底上制作了 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结肖特基光电二极管,截止波长 274 nm,在 50 V 偏下,267 nm 处峰值响应率为 0.09 A/W,探测率超过 $2.6 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。Ekmel Ozbay 等人在欧姆接触层和吸收层之间增加了一层势垒扩散区,显著提高了肖特基势垒光电二极管的可见光抑制比。2008 年,Turgut Tut 等人^[14]制作的 200 μm 直径的 p-i-n 二极管在 10 V 偏压下的暗电流为 5 fA,器件的击穿电压高达 200 V,在 280 nm 波长处,0 V 和 40 V 偏压的响应率分别为 0.052 A/W,0.093 A/W,器件的探测率为 $7.5 \times 10^{14} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。除了用蓝宝石作为衬底,一些科研人员也在尝试用硅作为衬底,相对于蓝宝石衬底,硅衬底可以透过 200 nm 以下的远紫外光谱。比利时的 Pawel E. Malinowski 等人^[15]在 Si(111)衬底上制作了 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{N}$ 肖特基型二极管,在 -0.5 V 电压下,单个二极管具有极低的暗电流 100 pA/cm²。

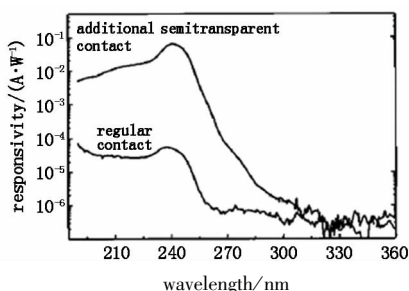


图 7 半透明焊接层和普通焊接层试验

由于紫外焦平面阵列在军事上的应用前景,在研制单个高性能器件的同时,各军事大国也在大力发展紫外焦平面阵列。1999 年,美国国家航空航天局首次报道了 GaN 基紫外焦平面阵列^[16],焦平面阵列规模 256×256 ,背面进光,像元尺寸 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,焦平面阵列通过钢柱和洛克希德马丁公司的 CMOS 读出电路相连。之后不久,美国 Nitronex 公司与北卡罗来那大学、Honeywell 技术中心以及美国军队夜视实验室成功地实现了基

于 AlGaN p-i-n 结的背照射 32×32 规模的紫外焦平面探测器,像元尺寸 $53 \mu\text{m} \times 53 \mu\text{m}$ ^[17]。但上述两个焦平面阵列的响应波段均不处于日盲区。直到 2000 年,BAE 系统的 P. Lamarre 等人首次报道了日盲型紫外焦平面阵列^[18],实现了基于 AlGaN p-i-n 结的背照射 256×256 规模的日盲紫外焦平面探测器,像元尺寸 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,焦平面阵列通过钢柱和 BAE 系统公司的 CTIA 输入级的 256×256 硅 CMOS 读出电路相连。2005 年,美国西北大学的科研人员报道了工作在 280 nm, 320×256 日盲型 AlGaN 紫外焦平面,采用 In 柱将探测器阵列与 Indigo Systems 公司生产的 9809 型硅读出电路集成,并首次进行了 320×256 面阵成像演示^[19],成像质量较好,如图 8 所示。之后相继有 256×256 , 320×256 等规模的日盲紫外焦平面阵列报道和成像演示。

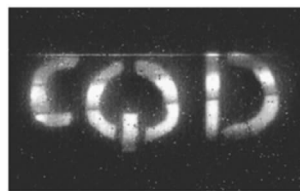


图 8 320×256 紫外焦平面所成的像

4 总结

目前 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 基日盲紫外探测器的研究已取得阶段性进展,但材料的研究还面临着很多困难:缺少晶格匹配的衬底,使薄膜中存在大量缺陷;随 Al 摩尔比率的增加,由于 Al 原子和 Ga 原子的迁移率不同,造成组分不均一;p 型掺杂质量较低。这些因素严重制约着器件性能。

总体来说固态紫外探测器还没有进入大规模的实用化阶段,现阶段使用的紫外探测器依然是以真空探测器为主。一旦材料问题得以解决,固态紫外探测器凭借其巨大的优势将会迅速替代大部分的真空紫外探测器,并将进一步扩展紫外探测器的应用范围。

参考文献:

- [1] Paul Schreiber, et al. Solar blind UV region and UV detector development objectives [J]. SPIE, 1999, 3629: 230-248.
- [2] Roth W. The DSI diode-a fast large-area optoelectronic detector[J]. IEEE Trans. E. D, 1985: ED-32(6):1034.
- [3] Amano H, Sawaki N, et al. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer[J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 48:353-355.

- [4] Amano H, Kito M, et al. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low energy electron beam irradiation (LEEBI)[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, 28:L2 112.
- [5] Khan M A, et al. High-responsivity photoconductive ultraviolet sensors based on insulating single-crystal GaN epilayers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60 (23): 2917 – 2919.
- [6] Khan M A, et al. Schottky barrier photodetector based on Mg-doped p-type GaN films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(9): 1202 – 1204.
- [7] Khan M A, et al. Visible-blind ultraviolet photodetectors based on GaN p-n junctions [J]. *Electronics Letters.*, 1995, 31: 1781 – 1782.
- [8] D Walker, X Zhang, et al. AlGa_N ultraviolet photoconductors grown on sapphire[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68: 2100 – 2101.
- [9] B W Lim, Q C Chen, et al. High responsivity intrinsic photoconductors based on AlGa_N[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68: 3761 – 3762.
- [10] Ting Li, D J H Lambert, et al. Solar-blind Al_xGa_{1-x}N-based metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36: 1581 – 1583.
- [11] J Y Duboz, J L Reverchon, et al. Submicron metal-semiconductor-metal ultraviolet detectors based on AlGa_N grown on silicon: results and simulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92: 5602 – 5604.
- [12] D Walker, V Kumar, et al. Solar-blind AlGa_N photodiodes with very low cutoff wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76: 403 – 405.
- [13] Necmi Biyikli, et al. Solar-blind AlGa_N-based schottky photodiodes with low noise and high detectivity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81: 3272 – 3274.
- [14] Turgut Tut, et al. Solar-blind AlGa_N-based p-i-n photodetectors with high breakdown voltage and detectivity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92, 103502: 1 – 3.
- [15] Pawel E Malinowski, et al. 10 μm Pixel-to-Pixel pitch hybrid backside illuminated AlGa_N-on-Si imagers for solar blind EUV radiation detection [J]. *IEEE*, 2010, IEDM10: 348 – 351.
- [16] Z C Huang, D B Mott, P K Shu. 256 × 256 Ga_N ultraviolet imaging array [J]. *Space Technology and Applications International Forum*. Paper CP, 420.
- [17] J D Brown, Z Yu, et al. Visible-blind UV digital camera based on a 32 × 32 array of Ga_N/AlGa_N p-i-n photodiodes [J]. *Nitride Semicond*, 1999, Res. 4.
- [18] P Lamarre, A Hairston, et al. AlGa_N UV focal plane arrays [J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2001, 188: 289 – 292.
- [19] R McClintock, et al. 320 × 256 solar-blind focal plane arrays based on Al_xGa_{1-x}N [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 011117.