

GaN 基紫外探测器

李 雪 *

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘 要 随着 GaN 基紫外材料的日益成熟, GaN 基紫外探测器发展迅速, 被认为是和发光二极管、激光器同样重要的器件。本文讨论了紫外探测的意义, 介绍了国内外近期研制的各种器件结构的 GaN 基紫外探测器和紫外焦平面。

关键词 日盲特性 GaN 基紫外探测器

1 紫外探测的意义

紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后发展起来的又一军民两用光电探测技术。由于臭氧对 300nm 以下的紫外辐射有强烈的吸收作用, 所有来自太阳辐射中的紫外线, 只有波长为 300nm ~ 400nm 的近紫外线能透过大气层到达地面, 因此, 由于没有太阳的背景辐射, 在地球上或臭氧层以下的大气层中波长在 220nm ~ 300nm 的辐射就很容易被探测到。而其他波段的光探测器就会受到太阳辐射的干扰, 特别是在白天。工作在这个波段的探测器被称为“盲阳”。正是基于紫外线的“日盲”特性以及它在地球大气层中因均匀散射而呈现的背景条件, 紫外探测器方可对那些尾焰或羽烟中能释放出大量紫外辐射的飞行目标进行实时探测或有效跟踪, 在微弱的背景下探测出导弹。因此, “太阳光谱盲区”的紫外告警为反辐射导弹逼近告警提供了一种极其有效的手段^[1]。德国宇航公司研制的“米尔兹”, 即采用高灵敏度、高分辨率的成像型紫外传感器, 探测超音速导弹的发射与逼近, 美国、日本和德国等国家的大学和公司也开展了紫外探测的研究, 在 1997 年美国国防部发展计划中就包含了紫外发光和紫外探测方面的研究工作。因此紫外探测器的研制在军事技术与民用市场的开发中具有很高的实用价值。

紫外探测器有真空二极管、光电倍增管、固体探测器、MCP 探测器及电子成像型探测器等多种形式, 由于探测灵敏度高, 目前主要使用的是光电倍增管, 但由于其本身体积大、功耗大、工作电压高, 而且成本高, 因此限制了紫外成像系统的应用。为此, 发展新型的 III 族氮化物光电材料的紫外探测器, 成为人们关注的重点。

2 GaN 基紫外探测器研究进展

由于 GaN 基紫外光电探测器在波长短于 365nm 的紫外波段具有锐利可调的截止响应特性, 响应波长范围可以从 365nm(禁带宽度为 3.4eV 的 GaN) 变到 200nm(禁带宽度为 6.2eV 的 AlN), 能够在不受长波长辐射的影响下探测日盲区的特性, 因而成为紫外探测器的重要发展方向^[2]。1998 年美国国防高级研究计划局(DARPA) 开始研制工作在 250nm ~ 300nm 波段的 GaN 基紫外探测器。美国 APA optics 公司和科罗拉多(Colorrado) 洲卫生保健制品公司于 1999 年分别推出了民用的单元 GaN 基紫外探测器。欧盟环境气候署于 1999 年开展了对 UV-B 波段进行探测的 ALDUV 计划^[3]。

事实上, 许多可见光甚至红外传感器都可以在紫外波段使用, 例如 Si 和 SiC 探测器, 已经提供了很好的性能。然而, 抑制可见光需要使用滤光装置, 这无疑会增加制造的复杂性并

* 2002 级博士研究生

降低性能。S 降低性能。i 探测器是目前被应用的最好的紫外探测器, 波长可至 250nm, 但作为间接带隙半导体, 无法提供锐利的截止波长是制备好的光谱响应器件的致命弱点。因此基于 III 族氮化物的光电探测器引起人们的注意, 它提供的一系列优越性能大大超过了传统的紫外以及可见光光电探测器: 直接带隙结构带来的高量子效率、可形成异质结、低表面复合率、固有的盲阳特性、通过调整合金组份可以获得一个合适的陡峭的截止波长以及在苛刻的物理和化学环境中的高稳定性。

近年来, III 族氮化物光电探测器迅速发展, GaN 基 UV 探测器研究先后采用光导型、MSM 肖特基结型、P-I-N 型以及光三极管型多种器件结构^[2-6]。光导型探测器结构简单, 内部增益高, 但缺点是响应速度慢、暗电流高、长波波段会出现假信号现象等, 不适合于直流、高速的工作要求。肖特基型已经研制出了正入射、背入射结构探测器, 这种器件可以快速响应, 有较高的可见光抑制比, 可用于环境监测并制成紫外光探测器阵列, 但由于受势垒高度的限制, 耗尽层窄, 漏电流比 p-i-n 探测器高; MSM 型是目前报道响应速度最快的器件, 响应时间只有 23ps; 光三极管型探测器一般采用 p-n, p-i-n 结的形式, p-i-n 器件 i 层引入拓展耗尽层, 可以形成探测器的高场吸收区。下面分别讨论各类探测器目前的研究现状。

2.1 光导探测器

光导器件包括两个半导体柱, 位于顶部, 和 GaN 材料形成欧姆接触。光导器件由于快速的空穴俘获和较慢的电子俘获, 在室温可以产生很大增益^[7], 所以光导器件的响应率很高, 可达 1000A/W(电场 1kV/cm), 并强烈依赖于入射光强, 时间响应较长, 为 1ms, 尽管光导器件的响应率很高, 但由于变窄的带宽和较高的暗电流, 导致器件呈现了较低的探测率, 在 $10^7 \sim 10^8$ 数量级^[8]。依赖频率的噪声光谱表明, 低 Al 含量的光导器件的噪声在高频时以 Johnson 噪声为主。在高 Al 含量的器件中 AlN 的噪声要大于 Johnson 噪声。

光导器件较大的响应率可以用电导区光诱发模型解释, 光导器件的响应率可由下式表达^[9]:

$$R = \frac{\Delta I}{P_{opt}} = \frac{qV_B\mu_e}{LP_{opt}}(S\Delta n + n\Delta S) \quad (1)$$

式中, μ_e 为电子迁移率, L 为电极间距, S 为外延区, n 为自由载流子浓度, Δn 为光生载流子浓度, ΔS 为光诱发器件有效电导区的变化。

由于响应率依赖光强, 所以器件的响应主要受 (1) 式中第二项的影响, 等式 (1) 可以表达为

$$R \approx \frac{V_B\mu_e z}{P_{opt}L}(2q\epsilon N_d)^{1/2}[\varphi^{1/2} - (\varphi_0 - V_{ph})^{1/2}]$$

式中, z 为层厚, N_d 为掺杂浓度, φ_0 为势垒, V_{ph} 为光生电压。

尽管光导器件的响应率很大, 但由于其响应与入射光强的非线性、较差的可见光抑制比以及对温度的强烈依赖性, 因此不适合更多应用。尽管可以通过使用锁定探测系统来改善入射光的线性, 在高补偿材料中降低暗电流, 然而, 这种结构导致响应率的降低, 使测试系统变得更加复杂, 光导器件失去了原有的优点。

相比而言, 光伏器件, 如 Schottky 光电探测器、MSM 和 p-n 结光电二极管响应速度快, 响应率与入射光强成正比, 具有很好的可见光抑制比。

2.2 肖特基探测器

肖特基器件包含一个半透明的肖特基接触和一个欧姆接触, 基本结构见图 1^[10], 光谱响应率随 Al 组分的变化见图 2。肖特基接触为禁带上的激子提供了平滑的不依赖入射光强和温度的响应率, 这主要原因是肖特基器件的空间电荷区位于半导体表面, 抑制了在 p-n 和 p-i-n 器件中观察到的短波时量子效率的降低, 这也是 AlGaIn 肖特基器件的一大优势^[11,12]; $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$ 的可见光抑制比可达到 10^4 , 最小时间常数为 ns 数量级, 漏电流可达到 $10^{-8}A/cm^2$, 在偏压较低时, 肖特基器件的噪声以 Johnson 为主, 在高偏

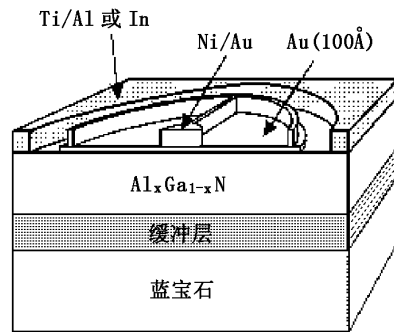


图 1 AlGaIn 肖特基型紫外探测器

压时转变为 $1/f$ 噪声, 优值因子 R_0A 约为 $10^8 \Omega \text{cm}^2$, 365nm 波长处的响应率为 0.15A/W (光伏探测器在 365nm 波长处的最大响应率是 0.29A/W), 探测率可达到 $10^{13} \text{cm}^2 \text{W}^{-1} \text{Hz}^{1/2}$, 这种器件可以快速响应, 有较高的可见光抑制比, 已证明可用于环境监测和紫外光探测器阵列 [13,14]。

由于 GaN 的吸收系数较大, 扩散系数较小, 即载流子主要是在靠近表面的地方产生与复合, 因此这些器件面临的主要问题是高能量下响应的减弱。为了解决这个问题, 对于光入射到 p 端的 pn 结可以用非常薄得 p 型层; 对于前端照射的肖特基二极管可用薄的透明的金属接触; 对于背照射必须使用透明的 AlGaIn 层。对于扩散长度的限制作用, 在设计给定响应带宽的探测器时可以加以利用: 激活区的组份决定了长波方向的截止波长, 而它下面的一层可以决定短波长方向的截止波长 [15,16]。

肖特基二极管具有平滑的响应率, 适于宽带光电探测器, 最大响应率被半透明顶部接触的光反射限制。时间响应依赖于肖特基接触面积、材料的掺杂和迁移率。最早制成的肖特基 GaN 光电探测器采用 Ti/GaN 二极管 [17], 可见抑制比仅为 20, 响应率为 130mA/W ; chen 等人 [40] 使用 5nm Pd 在 n 型 GaN 上制成肖特基二极管, 响应率为 180mA/W , 受 RC 电路限制的时间常数为 118ns , 反向偏压为 -1.35V 时等效噪声功率为 4.0nW ; 近来 E.Monroy 等人 [32,41] 采用 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上制备 Au 和 Ni 半透明 Si:AlGaIn 肖特基光电探测器, 结果表明响应率与器件尺寸和肖特基金属无关, $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$

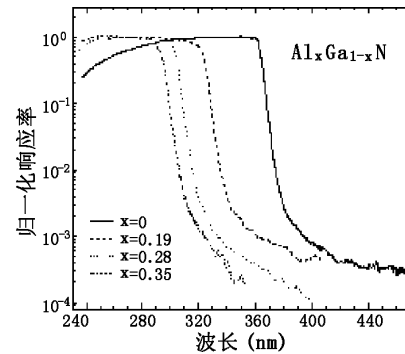


图 2 不同 Al 含量 AlGaIn 的光谱响应

的响应率, 在零偏压时为 29.4mA/W , 时间常数为 14ns , 等效噪声功率为 40.5nW 。

为获得快速反应器件, 可在未掺杂的顶层用肖特基接触, 在重掺杂的底层用欧姆接触发展垂直结构。

2.3 MSM 器件

MSM 光电器件的结构图见图 3, 在半导体顶部包括交叉指的肖特基接触或欧姆接触, 在这里主要以 MSM 肖特基器件为例。 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ MSM 器件的光谱响应见图 4。作用在两个肖特基结耗尽区上的电场分离电子空穴对, 形成电流, 影响 MSM 的响应率。MSM 器件通常采用简单的平面交叉指设计, 交叉指设计可以减小寄生电容, 增大电极接触面积 [18]。

MSM 光伏器件有宽线性动态范围和锐利的光谱响应, 具有高探测率 [19]。加高偏压时, MSM 具有高分辨率, 可见光抑制比可达到 $10^4 \sim 10^5$ 左右, 如采用 ELOG GaN, 可见光抑制比还可以再提高一个数量级。MSM 横向器件的电容较小, 器件可达到渡越时间极限, 响应时间只有 23ps [20], 对应很高的带宽。

2.4 P-N, p-i-n 型探测器

p-i-n 结构器件可以提供较好的灵敏度和快速响应, 采用 LPMOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长 AlGaIn 的 n-i-p 结构 [21], 厚度分别为 $1 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$, 利用电子束蒸发淀积 Ti/Au n 电极和 Ni/Au p 电极, 研究正面照射和背照射的器件性能, 该器件的截止波长从 227nm 到 364nm , 正面照射时, 零偏压峰值响应率为 44mA/W (对应波长 232nm), 相应的量子效率为 23.5% , 采用

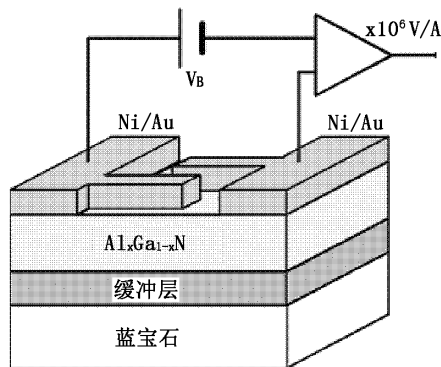
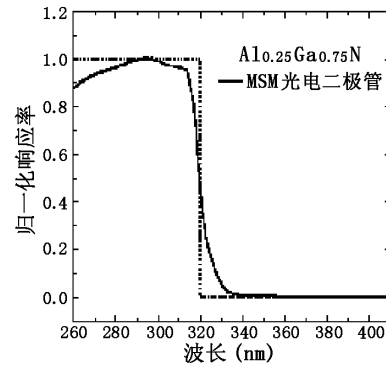


图3 MSM 器件结构及其电路

图4 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ MSM 探测器的响应光谱

ELOG 技术制备的器件响应率可达到 52mA/W ，可见光抑制比为 10^5 ，加 -5V 偏压，峰值响应率为 120mA/W (对应波长 232nm)，相应的量子效率为 64.1% ；背照射时，零偏压峰值响应率为 35mA/W (对应波长 278nm)，相应的量子效率为 15.6% ，可见光抑制比为 10^4 。

在蓝宝石衬底上采用反应分子束外延生长 $\text{AlGaIn(p)-GaIn(i)-GaIn(n)}$ 结构^[22]，生长顺序包括薄 AlN 缓冲层、 $3\mu\text{m}$ Si 掺杂 n-GaN 、 $1\mu\text{m}$ GaIn i 层、 $0.2\mu\text{m}$ Mg 掺杂 p-AlGaIn 、 10nm AlGaIn 钝化层，分别采用 Ti/Al/Ni/Au 多层合金 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 快速退火 30S 和 Ni/Au $650\text{ }^\circ\text{C}$ 氮气退火 90S 制作 n 和 p 电极接触。正面照射 $\text{AlGaIn(p)-GaIn(i)-GaIn(n)}$ 器件，在 $260\text{nm} \sim 300\text{nm}$ 有高响应率，未加偏压时峰值响应可达到 0.12A/W ，可见光抑制比在 10^3 以上，加 -10V 偏压后，器件仍保持锐利的截止波长和低噪声特性，响应率提高到 0.15A/W ；器件的等效噪声功率约为 $8.3\text{pW/Hz}^{1/2}$ ，响应时间可达到 12ns 。

2.5 GaN 基紫外焦平面

1999 年，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 AlGaIn P-I-N 型背照射 32×32 列阵焦平面探测器的数字照相机^[23]。响应波段为 $320\text{nm} \sim 365\text{nm}$ ，峰值响应率达到 0.2A/W (358nm)，内部量子效率达到 80% ， R_0A 为 $1.5 \times 10^9 \Omega\text{cm}^2$ ，计算得到的峰值探测率达到 $6.1 \times 10^{13} \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，为光电倍增管 5 倍左右。2001 年，他们成功展示了利用 128×128 紫外焦

平面探测器制备的数字照相机^[24]，响应波长在 $320\text{nm} \sim 365\text{nm}$ ，采用 In 柱将探测器列阵与 Indigo Systems 公司生产的 9802 型 Si 读出电路集成，最后用金丝将读出电路键压到芯片载体上。选定 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 的列阵进行性能测试，光谱响应率为 0.21A/W ，相应的量子效率为 82% ， 300K 探测率达到 $6.3 \times 10^{13} \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，这几乎是目前半导体光伏器件最大的探测率，响应时间的测量表明器件的上升时间为 1ns ，下降时间为 $0.1\mu\text{s}$ 。由于紫外照相机的潜在国防应用前景，这项工作获得了陆军研究办公室和国防高级研究项目的资助。军事应用希望太阳盲式紫外探测器能在 $250\text{nm} \sim 280\text{nm}$ 波段成像，这样就能跟踪导弹的载入而不为太阳光所干扰。因此，该研究小组 2002 年又成功制成了 320×256 的盲阳紫外探测器^[25]，但其中只有部分元成有效图象，且成像质量不如盲可见探测器清晰，主要原因是高 Al 含量的 AlGaIn 材料制备的困难。

3 结束语

GaN 材料在制造蓝光紫光和紫外光大功率短波长耐高温器件方面已经成功商业化， GaN 基紫外探测器处于研究阶段，它对于波长大于 365nm 的可见光和红外光是不敏感的，而对于波长小于 365nm 的紫外光却有很大的光响应，从而使探测器有更高的灵敏度。因此 GaN 紫外光探测器被认为是和蓝光发光二极管、蓝光激光器同样重要的 GaN 器件，基于三族氮化物的

紫外探测器在很多领域有着迷人的应用前景,主要包括火焰传感、臭氧监测、污染监测、水银灯消毒监控、激光探测器、太空飞船的监视和识别、空间通讯、定位焊接以及引擎和燃烧室的监控等应用^[24]。

参考文献

- [1] 李紫蕊. 新型紫外探测器及其应用. 光电子技术. 2000, V21(1): 45-51.
- [2] Jacques I. Pankove. GaN: from fundamentals to applications Materials Science and Engineering B61-62 (1999), 305-309.
- [3] E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, et al. AlGaIn-based UV photodetectors. J. Crys. Growth 230 (2001), 537-543.
- [4] L. B. Flannery a, I. Harrison a, D. E. Lacklison a, et al. Fabrication and characterisation of p-type GaN metal-semiconductor-metal ultraviolet photoconductors grown by MBE. Materials Science and Engineering B50 (1997), 307-310.
- [5] D. Walker, E. Monroy, P. Kung. "High-speed low-noise metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors based on GaN" Appl. Phys. Lett. V(74), 1999.
- [6] J. D. Brown, Zhonghai Yu. J. Matthews Visible-Blind UV Digital Camera Based On a 32×32 Array of GaN/AlGaIn p-i-n Photodiodes. MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.4, 9(1999).
- [7] Binet F., Duboz J.-Y., Rosencher E., et al. Mechanisms of recombination in GaN photodetectors, Appl. Phys. Lett. 69(1996) 1202.
- [8] D. Walker, X. Zhan, A. Saxler, et al. Al_xGa_{1-x}N ultraviolet photodetectors grown on sapphire by metal-organic chemical-vapor deposition. Appl. Phys. Lett. 70(8), (1997) 949-951.
- [9] E. Monroy, F. Calle, J.A. Garrido, et al. Si-doped Al_xGa_{1-x}N photoconductive detectors. Semicond. Sci. Technol.14 (1999), 685-689.
- [10] E. Monroy, F. Calle, J. L. Pau, et al. Analysis and modeling of Al_xGa_{1-x}N-based Schokky barrier photodiodes. J. Appl. Phys. 88(2000), 2081-2091.
- [11] E.Monroy, et al. Semicond. Sci. Technol.13, 1024(1998).
- [12] T. Li, A. L. Beck, C. Collins, et al. Appl. Phys. Lett.75, 2421(1999).
- [13] E. Monroy, et al. Appl. Opt.37, 5058(1998).
- [14] E. Mu*noz, E. Monroy, F. Calle, J. Geophys. Res. 105, 4865(2000).
- [15] Yang W., Nohova T., Krishnankutty S., et al. Back illuminated GaN/AlGaIn, heterojunction photodiodes with high quantum efficiency and low noise, Appl. Phys. Lett.73 (1998) 1086.
- [16] Kozodoy P., Ibbetson J.P., Marchand H., et al. Electrical characterization of GaN p-n junctions with and without threading dislocations, Appl. Phys. Lett. 73 (1998)975.
- [17] M. A. Khan, J. N. Kuznia, D. T. Olson, et al. Appl. Phys. Lett.63, 2455(1993).
Q. Chen, J. W. Yang, A. Osinsky, Appl. Phys. Lett.70, 2277(1997).
- [18] E. Monroy, F. Calle, E. Mu*noz, et al. Al_xGa_{1-x}N:Si Schottky barrier photodiodes with fast response and high detectivity. Appl. Phys. Lett.73 (1998)2146.
- [19] M. S. Shur. Introduction to Electronic Devices, Wiley, 1996.
- [20] E. Monroy, F. Calle, E. Muñoz, et al. Electronics Letters, 35, 1488(1999).
- [21] J. C. Carrano, T. Li, D. L. Brown. Very high-speed metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors fabricated on GaN, Applied Physics letters V(73), 1998.
- [22] Peter Sandvik, Kan Mi. Fatemeh Shahedipour, Ryan McClintock, Alireza Yasan, Patrick Kung, Manijeh Razeghi*, Al_xGa_{1-x}N for solar-blind UV detectors, Journal of Crystal Growth 231 (2001) 366-370.
- [23] G. Y. Xu, A. Salvador, W. Kim, et al. High speed, low noise ultraviolet photodetectors based on GaN p-i-n and AlGaIn(p)-GaIn(i)-GaIn(n) structures. Appl. Phys. Lett. 71(15), pp.2154-2156, 13 October, 1997.
- [24] J. D. Brown, J. Boney, J. Matthews, et al. UV-Specific (320nm ~ 365nm) Digital Camera Based On a 128×128 Focal Plane Array of GaN/AlGaIn p-i-n Photodiodes, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 5, 6(2000).
- [25] J. P. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews, et al. UV detectors and focal plane array imagers based on Al-GaN p-i-n photodiodes, OPTO-Electronics Review 10(4), 251-260 (2002).