

文章编号:1001-5078(2007)09-0867-03

AlGaIn/GaN P-I-N 紫外探测器的电子辐照效应

白云, 邵秀梅, 张燕, 李向阳, 龚海梅

(中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200083)

摘要:制备了 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结 P-I-N 结构可见盲正照射紫外探测器。用能量为 0.8 MeV 的电子对器件依次进行注量为 5×10^{14} , 5×10^{15} 和 $5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 的辐照。通过测量辐照前后器件的 $I-V$ 曲线和光谱响应曲线, 讨论了不同注量的电子辐照对 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结 P-I-N 器件性能的影响。实验表明, 小注量的电子辐照对器件的反向暗电流影响不大, 当电子注量 $\geq 5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 时才使器件的暗电流增大一个数量级。为了分析器件的辐照失效机理, 制备 SiN/GaN 的 MIS 结构, 并对其进行了电子辐照, 发现 SiN/GaN 之间的界面态随着电子辐照注量的增加而增加。这表明, 器件的暗电流增大的原因之一为钝化层与 GaN 材料之间因为辐照诱生的界面态。辐照前后器件的光谱响应曲线表明, 电子辐照对器件的响应率没有产生明显的影响。

关键词: AlGaIn; P-I-N; 电子辐照; MIS 结构

中图分类号: TN36; TN23 **文献标识码:** A

Effect of Electron Irradiation on the AlGaIn/GaN P-I-N UV Detector

BAI Yun, SHAO Xiu-mei, ZHANG Yan, LI Xiang-yang, GONG Hai-mei

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure front illuminated visible-blind UV photodetectors were fabricated. The diodes were irradiated with 0.8 MeV electrons at fluences of 5×10^{13} , 5×10^{14} and $5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ in turn. $I-V$ characterization and response spectrum of the detectors were measured before and after irradiation to analyze the irradiation effect. After higher electron fluence of irradiation, the reverse leakage current is enlarged with one order. Then the SiN/n-GaN metal insulator semiconductor diodes were fabricated to study the effect on the electrical properties of SiN/n-GaN interface. The results showed that the electron irradiation induces new interface density between the SiN and GaN. The response spectrum after irradiation is slightly smaller than before irradiation which shows the radiation hardness of the AlGaIn photodetector.

Key words: AlGaIn; P-I-N; electron irradiation; MIS structure

1 引言

$\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 材料由于其优良的物理、化学特性, 在蓝绿发光二极管、蓝色激光器及紫外探测器等领域具有广泛的应用前景。AlGaIn 属于直接带隙半导体, 通过调整 AlGaIn 材料中 Al 的组分, 其禁带宽度可以由 3.4 eV (GaN) ~ 6.2 eV (AlN) 连续变化, 从而可以制备可见盲和日盲波段的紫外探测器。当 GaN 基紫外探测器用于空间时, 这些器件就要在恶劣的

高辐射条件下工作, 因此空间辐照环境下器件的失效研究具有很重要的意义。作为宽禁带半导体材料, GaN 基材料具有优良的抗辐照特性。目前, 国内外关于 GaN 基材料和器件的辐照效应已有报道。研究人员利用深能级瞬态谱 (DLTS) 及光致发光谱

作者简介: 白云 (1978 -), 女, 博士研究生, 研究方向为 GaN 基紫外探测器的研制及抗辐照技术。E-mail: baiyun@mail.sitp.ac.cn
收稿日期: 2007-04-05

(PL谱)等实验报道了由于不同粒子或离子的辐照对 GaN 材料的电学性能和光学性质的影响^[1-6]。G. A. Umama-Membreno 等人^[5]的研究表明 γ 辐照在 N 型 GaN 中诱生了新的缺陷能级,且对辐照前的陷阱没有明显的影响。S. A. Goodman 研究组^[3]用电子辐照 N 型 GaN 材料,发现电子辐照在材料中也引起了新的缺陷能级。在器件方面,除了有 GaN 发光二极管,HEMT 的辐照效应的研究以外^[7-9],GaN 肖特基器件的辐照效应也已有报道^[10-13]。G. A. Umama-Membreno 等人^[5]报道了 γ 辐照对器件性能的影响,C. W. Wang 研究了中子辐照对 GaN 肖特基器件的影响^[12]。作为紫外探测器,P-I-N 结构的 AlGaIn 器件具有在日盲和可见盲波段的重要应用。但是,目前关于这类的紫外探测器件的辐照效应的研究还少有报道。本文用不同注量的电子辐照了 AlGaIn 紫外探测器,测量了辐照前后的 $I-V$ 特性,光谱响应曲线,分析和讨论了电子辐照对器件的影响及失效机理。

2 实验

实验中所用 GaN 基 P-I-N 紫外探测器的结构如图 1 所示。GaN 基材料用 MOCVD 方法生长:首先在蓝宝石(0001)衬底上温度为 550℃ 下生长一层低温 AlN 缓冲层,厚度约为 20nm,然后在 1100℃ 生长高掺杂 N 型 GaN 外延层,厚度约为 2.5 μm ,掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;接着生长本征 GaN 外延层,厚度约为 0.4 μm ,电子浓度为 $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,然后再生长 P 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$,空穴浓度为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 0.15 μm 。P 层采用电子束蒸发 Ni/Au 做电极,厚度为 20nm/20nm,在空气氛围中 550℃ 退火 1min 形成欧姆接触。Ar 离子刻蚀到 N 层后用 PECVD 生长 200nm 的 SiN 钝化膜,N 层采用溅射 In/Au 形成欧姆接触。为了分析辐照对 SiN 与 GaN 界面间电学性质产生的影响,我们在本征 GaN 上制备了 SiN/GaN 的 MIS 结构,其中 SiN 厚度为 200nm,欧姆接触同样为 In/Au。电子辐照实验在中国科学院上海辐照中心完成,电子能量为 0.8MeV。器件所受电子辐照的注量依次为 5×10^{13} , 5×10^{14} , 5×10^{15} 和 $5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$,辐照实验都在器件的零偏压情况下进行。AlGaIn 的 P-I-N 器件的 $I-V$ 特性测试采用计算机控制的 KEITHLEY 236 源测量单元。在 P-I-N 器件响应光谱测试中,用氙灯作为紫外光源(350W),其出射光经聚焦后经过光栅单色仪后照射到待测器件上。器件的光生电流经电流放大器(Stanford

SR570)放大后,采用数字万用表(VC98)采集。用紫外增强的 Si 光电二极管对器件的响应光谱进行标准化处理。同时我们还制备了 SiN/GaN 的 MIS 结构,以研究电子辐照在 SiN 和 GaN 材料之间界面产生的影响。SiN/GaN 界面的电学性质通过测量不同频率下的 $C-V$ 曲线经过计算得到,所用仪器为 HP4194A Multi-Frequency LCR Meter。所有实验均在室温下进行。

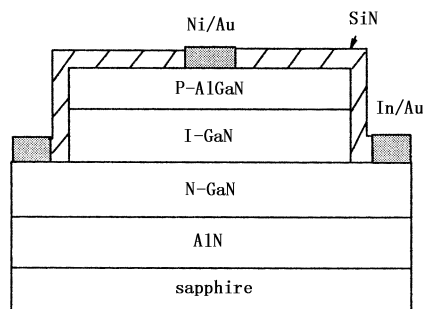


图1 AlGaIn/GaN P-I-N 紫外探测器结构

3 结果与讨论

3.1 电子辐照对 AlGaIn/GaN P-I-N 器件性能的影响

在辐照前后,测量了 AlGaIn/GaN P-I-N 器件的 $I-V$ 特性,如图 2 所示。辐照前在反偏 -5V 时,器件的暗电流为 10^{-10} A ,依次经过小注量的电子辐照 5×10^{14} , $5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 后,器件的暗电流没有发生明显变化。当辐照注量达到 $5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 时,器件的暗电流增大了一个数量级,同时零偏压电阻也减小了两个数量级。

从辐照对器件的响应光谱的影响来看,如图 3 所示,电子注量在 $\leq 5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 范围内,器件的响应率由 0.072A/W 稍稍减小至 0.067A/W,由此可见,电子辐照对器件的响应率影响不大,同时对响应光谱的形状也没有产生明显的作用。

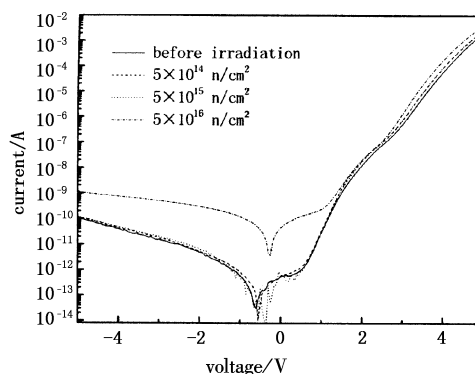


图2 AlGaIn/GaN P-I-N 紫外探测器不同电子注量辐照前后的 $I-V$ 特性

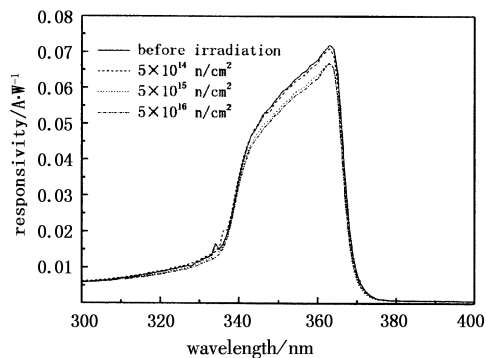


图3 AlGaIn/GaN P-I-N 紫外探测器不同电子注量辐照前后的响应光谱曲线

3.2 电子辐照对 SiN/GaN 界面电学性质的影响

考虑到电子辐照同时会对钝化层 SiN 与 GaN 基材料之间的界面的电学性质产生影响,我们制备了 SiN/GaN 的 MIS 结构。通过测量 MIS 结构不同辐照注量前后的 $C-V$ 曲线,采用高低频方法^[14]计算了 SiN/GaN 之间的界面态密度随着电子注量的增加的变化,见图 4。

实验表明,辐照前 SiN/GaN 之间的界面态密度最小为 $3.09 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。经过电子注量依次为 $5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$, $5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 和 $5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 的辐照后,计算得到的最小界面态分别为 $4.47 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, $1.11 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $1.32 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。这表明,电子辐照使得 SiN/GaN 之间的界面态随着电子注量的增加而增加。

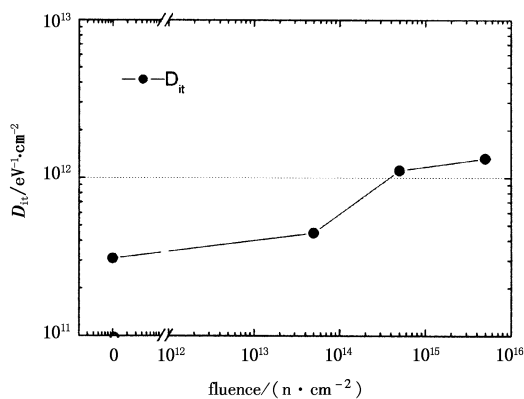


图4 SiN/GaN 的 MIS 结构中的界面态随电子辐照注量的变化

辐射感生界面态的过程,就是界面存在的大量弱键在辐射作用下断裂成悬挂键的过程,从而引入了新的界面能级,这是一个复杂的过程。因此,辐照在 SiN/GaN 界面诱生的界面态,可能是由于在 GaN 表面存在的弱键经过辐照后发生断裂而形成的。这就是电子辐照的电离效应。

同时,电子辐照还会在材料中诱生缺陷能级,这就是辐照的位移效应。2005 年 M. R. Hogsed 等人报道了 1MeV 电子辐照对 AlGaIn 材料的影响^[6]。他

们在 100K 温度下,用注量为 $9 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 的电子辐照 n-Al_{0.14}Ga_{0.86}N 材料,发现电子辐照在材料中诱生了四个新的能级,分别标记为 R1 ($0.15 \pm 0.02 \text{ eV}$), R2 ($0.21 \pm 0.02 \text{ eV}$), R3 ($0.26 \pm 0.02 \text{ eV}$) 和 R4 ($0.33 \pm 0.02 \text{ eV}$)。其中, R1, R2 被认为是 AlGaIn 材料中与 N 空位有关的缺陷。而 R4 能级是 AlGaIn 材料经过辐照后所独有的。

实验中观察到的器件的反向暗电流经过辐照后增大,原因之一可能就是由于电子辐照在 AlGaIn 材料中诱生的深能级缺陷造成的。深能级缺陷作为一种复合中心,会导致器件在反向偏置时,通过复合中心的电子和空穴还来不及复合就被外加的电场驱走,从而形成另一部分反向电流,因此导致器件的暗电流增加。

另外, SiN/GaN MIS 结构的辐照实验表明电子辐照中的电离效应在器件的钝化层 SiN 与 GaN 材料之间诱生了新的界面态,这种作为高产生-复合中心的界面态会造成器件表面漏电流的增加。

所以,我们认为是上面提到的两种失效机理同时作用导致的器件的反向暗电流经过辐照后增大。

由于在材料的生长过程和制备成器件的工艺中如刻蚀等,会由于光刻及刻蚀等工艺对材料造成损伤,从而与器件的性能密切相关。因此,只有辐照效应造成的损伤占主要机制时,才能对器件的性能造成明显的影响。因此,器件的响应率在辐照后没有发生明显的变化,我们认为是辐照造成的缺陷能级没有对光生载流子的收集占据主要机制。

4 结论

制备了 Al_{0.1}Ga_{0.9}N/GaN 异质结 P-I-N 结构的可见盲正照射紫外探测器和 SiN/GaN 的 MIS 结构,用能量为 0.8MeV 的电子对器件依次进行注量为 5×10^{13} , 5×10^{14} , 5×10^{15} 和 $5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 的辐照。通过测量辐照前后 P-I-N 器件的 $I-V$ 曲线和光谱响应曲线及 MIS 结构的高低频 $C-V$ 曲线,分析和讨论了不同注量的电子辐照对 P-I-N 器件性能的影响及器件的辐照失效机理。实验表明,小注量的电子辐照对器件的反向暗电流影响不大,当电子注量 $\geq 5 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ 时才使器件的暗电流增大一个数量级。同时发现 SiN/GaN 之间的界面态随着电子辐照注量的增加而增加。这表明,器件的暗电流的增大的原因之一为钝化层与 GaN 材料之间因为辐照诱生的界面态。同时也可能包括电子辐照在 AlGaIn 材料中诱生的新的缺陷能级的贡献。测量辐照前后器件的响应光谱曲线,表明电子辐照对器件的响应率没有产生明显的影响。

(下转第 873 页)

过率数据可以看出,一定质量浓度的冷凝型雾状油对可见光波段的遮蔽作用好于红外波段,对长波红外波段的遮蔽作用最弱。造成这一现象的主要原因是,自然冷凝型雾状油的粒径较小,与可见光波段波长接近,且粒径较为一致,实验结果与理论分析结果相一致。

从图8中可以更加明显地看到雾状油(柴油)烟幕在不同波段的遮蔽能力。遮蔽后电热油汀在可见光图像中人为无法辨认,遮蔽效果较好;中红外图像中的遮蔽区域温度明显变暗,观察点 Sp01 的温度由 63.0℃ 降低到 18.9℃,说明雾状油对中红外辐射产生了较强的衰减;长波红外波段的红外图像基本保持不变,观察点 Sp01 的温度仅变化了 2.4℃,说明其受到雾状油的遮蔽衰减影响较小。

5 结论

通过理论分析计算知道,满足一定粒径分布的雾状油具有可见光、中波红外及长波红外遮蔽作用,各波段的遮蔽性能与其粒径分布参数紧密联系。实验表明,以 0# 柴油为发烟剂所形成的冷凝型雾状油烟幕对可见光具有很好的遮蔽性能,对中红外波段具有一定的遮蔽作用,而对于长波红外波段的遮蔽作用最弱。由此可以看出,如果希望达到较好的多

波段遮蔽效果,在使用雾状油(柴油)的同时,还必须使用其他类型的烟幕作为辅助,以形成具有宽波段遮蔽能力的组合烟幕。同时,在对抗冷凝型雾状油(柴油)烟幕时,可以使光电对抗设备工作在长波红外波段。

参考文献:

- [1] Elkins Rush E, Kohl, R H. Proceedings of the smoke/obscurants [C]//Symposium 5, Volume 2, ADA104761, 1981, Harry Diamond Laboratories, Adelphi, Maryland.
- [2] XM56 type classifid-A new era of large area obscuration begins [C]//Army R D&A, March-April, 1995.
- [3] Smoke generating system [Z]. Mlcroturbo France, 1991.
- [4] 时家明, 路远. 红外对抗原理 [M]. 北京: 解放军出版社, 2002; 232 - 234.
- [5] 江长荫. 均匀圆球对平面波的散射 [J]. 电波科学学报, 1996, 11(3): 65 - 88.
- [6] H C van de Hulst. Light scattering by small particles [M]. New York: Dover Publications, 1981; 114 - 164.
- [7] Pollok D, Accetta J, Shumaker D L. The infrared & electro-optical systems handbook [M]. Countermeasure System Vol. 7 Mic-Michigan; Environment Research Institute, 1993.
- [8] 卢正永. 气溶胶科学引论 [M]. 北京: 原子能出版社, 2000; 12 - 14.
- [9] Li C, Subramanian S, Neutron Irradiation Effects in GaN-based blue LEDs [J]. Trans. Nucl. Sci., 2003, 50 (6): 1998 - 2002.
- [10] Hu X W, Karmarkar A P, Jun B, et al. Proton-irradiation effects on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. Trans. Nucl. Sci., 2003, 50: 1791 - 1796.
- [11] Cai S J, Tang Y S, Li R, et al. Annealing behavior of a proton irradiated $Al_xGa_{1-x}N/GaN$ high electron mobility transistor grown by MBE [J]. Trans. Electron. Devices, 2000, 47: 304 - 307.
- [12] Goodman S A, Auret F D, et al. Radiation induced defects in MOVPE grown n-GaN [J]. Mater. Sci. Eng., 2000, B71: 100 - 103.
- [13] Legodi M J, Hullavarad S S, Goodman S A, et al. Defect characterization by DLTS of AlGaIn UV Schottky photodetectors [J]. Phys. B, 2001, 308 - 310: 1189 - 1192.
- [14] Wang C W. Neutron irradiation effects on visible-blind Au/GaN Schottky barrier detectors grown on Si (111) [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(9): 1568 - 1570.
- [15] Wang C W. Neutron irradiation effect on radio-frequency magnetron-sputtered GaN thin films and Au/GaN Schottky diodes [J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 2002, 20 (5): 1821 - 1826.
- [16] Choelhywi B, Gerald L. Low-temperature preparation of GaN-SiO₂ interfaces with low defect density I. Two-step remote plasma-assisted oxidation-deposition process [J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 2004, 22(6): 2402 - 2410.

(上接第 869 页)

致谢: 中国科学院半导体所赵德刚副研究员为本文提供了 AlGaIn 材料, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Shmidt N M, Davydov D V, Emtsev V V, et al. Effect of annealing on defects in as-grown and γ -ray irradiated n-GaN layers [J]. Phys. Stat. Sol. (b), 1999, 216: 533 - 536.
- [2] Wang C W, Soong B S, Chen J Y, et al. Effects of gamma-ray irradiation on the microstructural and luminescent properties of radio-frequency magnetron-sputtered GaN thin films [J]. J. Appl. Phys. 2000, 88 (11): 6355 - 6358.
- [3] Goodman S A, Auret F D, Koschnick F K, et al. Radiation induced defects in MOVPE grown n-GaN [J]. Mater. Sci. Eng., 2000, B71: 100 - 103.
- [4] Umana-Membreno G A, Dell J M, Hessler T P, et al. ⁶⁰Co gamma-irradiation-induced defects in n-GaN [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80 (23): 4354 - 4356.
- [5] Umana-Membreno G A, Dell J M, Parish G, et al. ⁶⁰Co-Gamma Irradiation Effects on n-GaN Schottky Diodes [J]. IEEE, Trans. Electron. Devices, 2003, 50(12): 2326 - 2334.
- [6] Hogsed M R, Yeo Y K, Ahoujja M, et al. Radiation-induced electron traps in Al_{0.14}Ga_{0.86}N by 1MeV electron radiation [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 261906 - 261908.