

中子辐照对 AlGaN/GaN 高电子迁移率 晶体管器件电特性的影响*

谷文萍^{1)2)†} 张林¹⁾ 李清华¹⁾ 邱彦章¹⁾ 郝跃²⁾ 全思¹⁾ 刘盼枝¹⁾

1)(长安大学电子与控制工程学院, 西安 710064)

2)(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2013年10月15日收到; 2013年11月1日收到修改稿)

本文采用能量为 1 MeV 的中子对 SiN 钝化的 AlGaN/GaN HEMT (高电子迁移率晶体管) 器件进行了最高注量为 10^{15} cm^{-2} 的辐照. 实验发现: 当注量小于 10^{14} cm^{-2} 时, 器件特性退化很小, 其中栅电流有轻微变化 (正向栅电流 I_F 增加, 反向栅电流 I_R 减小), 随着中子注量上升, I_R 迅速降低. 而当注量达到 10^{15} cm^{-2} 时, 在膝点电压附近, 器件跨导有所下降. 此外, 中子辐照后, 器件欧姆接触的方块电阻退化很小, 而肖特基特性退化却相对明显. 通过分析发现辐照在 SiN 钝化层中引入的感生缺陷引起了膝点电压附近漏电流和反向栅泄漏电流的减小. 以上结果也表明, SiN 钝化可以有效地抑制中子辐照感生表面态电荷, 从而屏蔽了绝大部分的中子辐照影响. 这也证明 SiN 钝化的 AlGaN/GaN HEMT 器件很适合在太空等需要抗位移损伤的环境中应用.

关键词: AlGaN/GaN HEMT, 中子辐照, 缺陷, 退火

PACS: 72.80.Ey, 73.20.-r, 73.40.-c, 29.25.Dz

DOI: 10.7498/aps.63.047202

1 引言

由于具有优越的抗辐射和出色的微波功率、高温、高压等特性, AlGaN/GaN HEMT (高电子迁移率晶体管) 器件在卫星、太空探测、核反应堆等辐射环境中具有巨大的应用前景. 作为宽禁带半导体, GaN 材料原子键能很强, 其中 GaN 中 Ga 原子的位移阈能 20.5 eV 要远高于 GaAs 中的 9.8 eV^[1-3]. 然而, 虽然理论上 AlGaN/GaN HEMT 器件的抗辐射特性很强, 但是由于受到目前材料质量、器件工艺水平等因素的影响以及 AlGaN/GaN HEMT 器件在结构、载流子产生和输运机制等方面与其他半导体器件存在很大的差异, 使得辐射引起 AlGaN/GaN HEMT 器件的退化规律和退化机制变得非常复杂, 需要开展深入研究. 因此近几年 GaN

基器件在 γ 射线、电子、质子和中子等辐射下的特性退化研究开始受到关注^[4-6]. Gu 等^[7] 研究了 γ 射线辐照对 HEMT 器件性能的影响, 发现辐照感生表面态电荷的产生是造成 AlGaN/GaN HEMT 器件电特性退化的主要原因之一.

中子是核辐射环境中造成半导体器件退化的主要位移粒子, 也是目前用于研究半导体器件辐照位移损伤中最主要的粒子之一. 先前 Polyakov 等^[8] 报道了中子辐照对 AlGaN/GaN 异质结材料电特性的影响, 发现只有当中子注量远大于 10^{15} cm^{-2} 时, 辐照在异质结材料中感生的位移缺陷才会显著影响二维电子气和迁移率的乘积, 注量小于 10^{15} cm^{-2} 时, GaN 基材料内辐照感生的位移缺陷相对较少, 对这两者的乘积影响并不大. Zhang 等^[9] 发现迁移率对中子相对敏感, 但是二维电子气几乎没退化, 中子轰击晶格过程中不

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 513270407, 61354)、预先研究项目 (批准号: 51311050112, 51308030102, 51308040301)、中央高校基本科研业务费 (批准号: CHD2012JC095) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2013JQ7028) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wpgu@chd.edu.cn

仅晶格结构轻微变形, 而且引入了带电的缺陷中心. McClory 等^[6]通过低温中子辐照 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT, 发现位移损伤形成过程与温度有很大关系. 总体上目前国内外有关 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT 器件中子辐照效应的研究还很少, 而作为一种很好的抗辐射器件, 很有必要研究它的辐照效应, 特别是需要对其辐射退化和损伤机制进行深入研究.

本文采用归一化能量为 1 MeV 的中子对 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT 器件进行辐射试验, 研究了不同中子注量下 GaN 基 HEMT 器件主要参数的退化规律, 并对辐射后室温下的退火效应加以分析, 讨论了 HEMT 器件中子辐照退化的物理机理.

2 器件制造和辐射实验

实验选用的 HEMT 器件结构如图 1 所示, SiN 钝化层厚度为 1000 nm, HEMT 器件栅长 1 μm, 栅宽为 100 μm, 源漏间距为 4 μm. 样品的中子辐照辐射源为脉冲反应堆, 其中子的归一化能量为 1 MeV, 考虑到 10¹⁵ cm⁻² 对于一般半导体器件已经算相当高的中子注量并且受到实验条件限制, 所以本文采用最大辐照注量为 10¹⁵ cm⁻². 试验中采用 HP4155 在线测试辐射样品的 *I-V* 和传输线矩阵特性, 辐射实验在室温下进行. 辐射完成 20 h 后, 研究器件的室温退火特性.

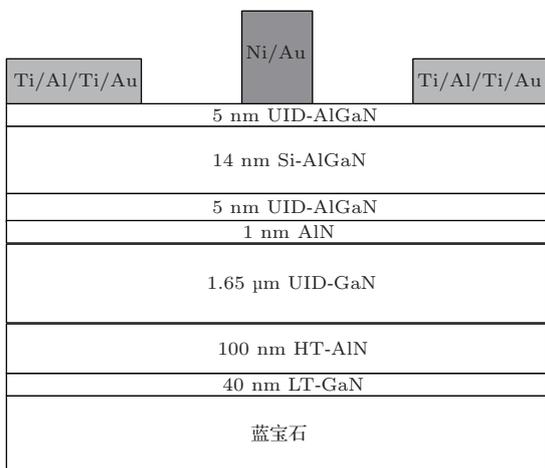


图 1 HEMT 器件的结构示意图

3 实验结果与分析

图 2 为 AlGa_{0.3}N/GaN 欧姆接触参数随中子辐照注量的退化, 左上角为退化曲线. 可以看出, 方块电阻 *R_{sh}* 退化在最高注量时也不过 6%, 这几乎可

以被忽略. 因此我们认为此中子辐照注量下欧姆接触性能的退化是可以忽略的.

图 3(a) 和 (b) 分别给出了不同中子注量下肖特基环正反向栅特性的退化. 可以看出, 只有在最高注量 10¹⁵ cm⁻² 下器件的反向栅泄漏电流才发生了较明显的减小.

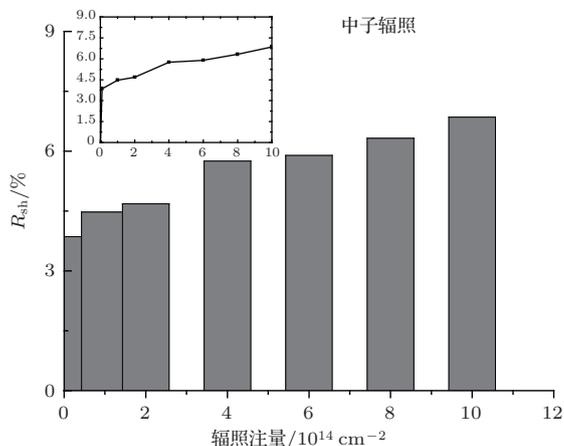


图 2 中子辐照前后 AlGa_{0.3}N/GaN 欧姆接触参数随辐照注量的退化

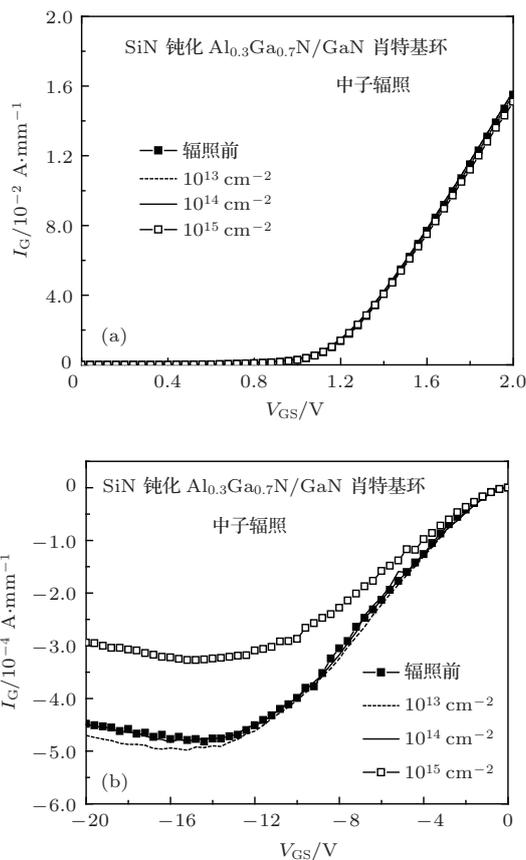


图 3 不同中子注量下肖特基环正反向栅特性的退化 (a) 正向特性; (b) 反向特性

图 4 为中子辐照前后 AlGa_{0.3}N/GaN HEMT 器件肖特基势垒高度随辐照注量的退化比较, 可以看

出随着辐射注量的增加,肖特基势垒高度最多降低2%,势垒高度基本没变.因此中子辐照对器件的欧姆接触和肖特基接触的影响很小,基本可以忽略;但是对反向栅泄漏电流影响很大,这在器件特性中会详细加以讨论.

图5给出了钝化AlGa_{0.3}N/GaN HEMT器件在不同中子注量辐射前后的输出特性曲线.可以看出,即使在最高注量10¹⁵ cm⁻²时,器件的输出特性也基本没有变化,只有膝点电压附近发生了比较小(不到10%)的退化.

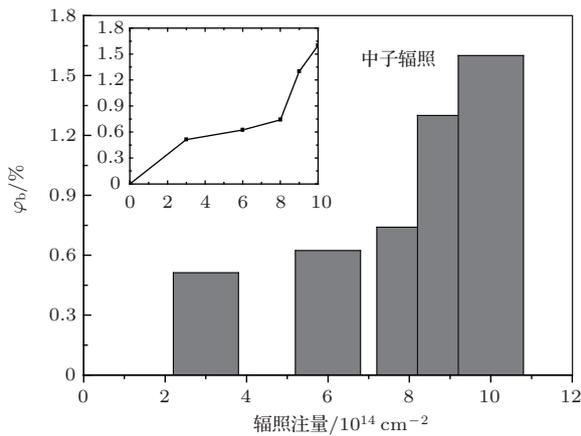


图4 肖特基势垒高度随中子辐照注量的变化

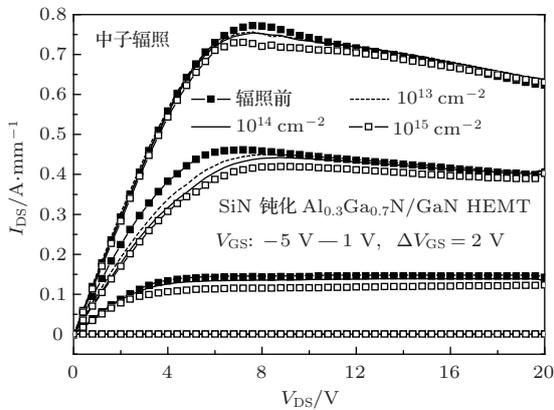


图5 不同中子注量辐射下HEMT器件输出特性的退化

图6(a)和(b)分别给出了不同中子注量下器件饱和区和膝点电压附近的转移曲线.从图6(a)可以看出,与输出曲线一致,即使在最高注量时,器件饱和区的转移特性也基本没变,这说明中子辐照过程中,SiN钝化层有效地阻止了电子陷落在表面态中,从而降低了辐照引起的二维电子气耗尽,钝化层屏蔽了绝大部分的辐照损伤.但是图6(b)中,在膝点电压附近,当中子注量小于10¹⁴ cm⁻²时,器件几乎没退化,不过随着注量增加至10¹⁵ cm⁻²

时,饱和漏电流和跨导峰值都发生了退化,整个辐照过程中阈值电压几乎没有漂移.膝点电压附近对应的是器件工作在弱饱和区,辐照之所以造成器件弱饱和区的退化是因为在SiN钝化层辐射感生缺陷导致的.因为位移阈能与晶格常数成反比,所以AlGa_{0.3}N和GaN的位移阈能大于SiN^[10],而本次的中子辐照注量相对较低,电极又有金属遮盖,所以辐照只是在SiN钝化层与AlGa_{0.3}N势垒层接触的表面感生了缺陷.

与电流崩塌的原理类似^[11],器件源漏和栅漏间隔区的缺陷态作用机制都可以用图7的等效电路简单表达,其中的1系列电阻为间隔区的寄生电阻,2系列电阻为辐照感生的表面态控制的虚栅电阻.

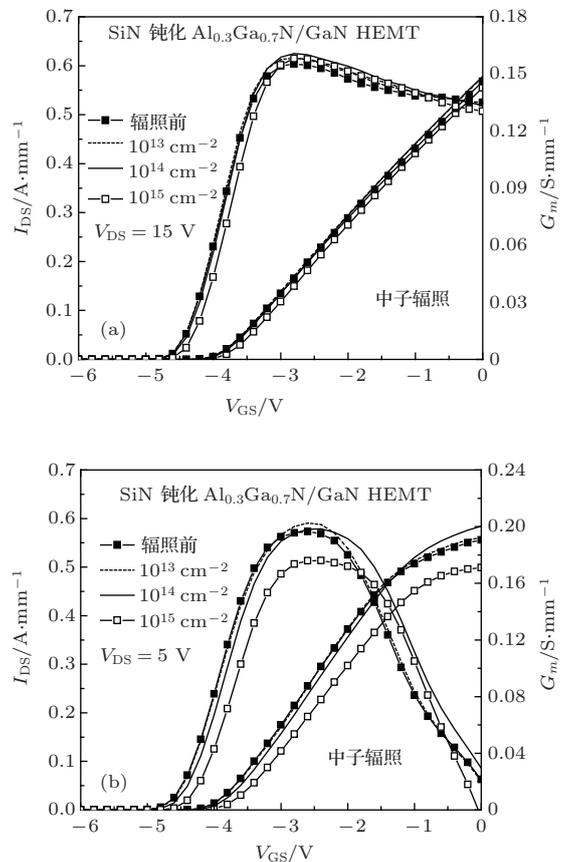


图6 不同中子注量辐射下HEMT器件转移特性的退化 (a)饱和区;(b)膝点电压附近

测试过程其实就是给上面电路中的电容充电的过程,以充电为例,对于未钝化器件,虽然辐照在整个源漏和栅漏间隔区都产生了缺陷,但是势垒表面的电子相对迁移率较高,所以间隔区的寄生电阻都比较小,而加电测试时,对电容的充电过程是从靠近栅的地方逐步扩展的,小的寄生电阻对寄

生电容的充电过程阻挡不大, 所以虚栅电阻在整个间隔区产生影响, 因此在 γ 射线辐射未钝化器件时, 饱和区和线性区的特性都发生了退化[7]; 如果有SiN钝化层时, 由于介质的加入降低了电子沿势垒表面的迁移概率, 使得寄生电阻比较大, 此时辐照虽然也在整个源漏和栅漏间隔区都产生了缺陷, 但是测试时逐级的电容充电会由于寄生电阻的阻挠变得越来越难, 所以主要的充电发生在栅边缘附近, 即只有栅边缘的虚栅电阻会对器件特性产生影响, 而此处的损伤对于深饱和区电特性的变化并不大, 它只会影响弱饱和区的特性退化, 所以我们只在膝点电压附近观察到比较明显的退化.

图8(a)和(b)分别给出了不同中子注量下器件正反向栅特性的退化. 可以看出, 辐照后器件的正向栅泄漏电流基本没变, 但是栅反向泄漏电流辐照后明显减小.

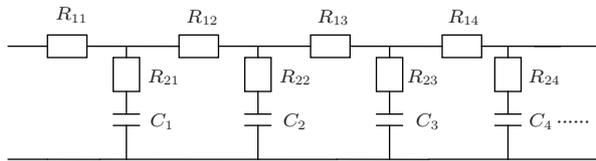


图7 表面缺陷态作用原理图

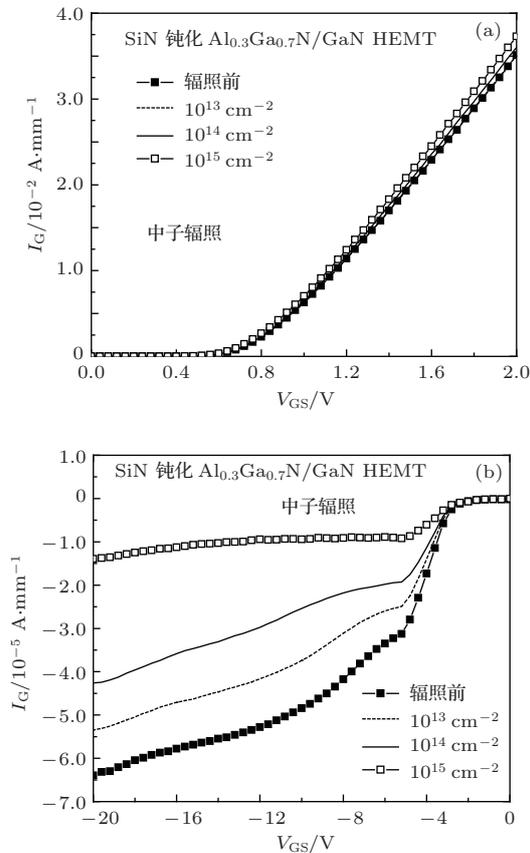


图8 不同中子注量下 HEMT 器件正反向栅特性的退化 (a) 正向特性; (b) 反向特性

图9给出了栅压 -20 V 处的反向栅泄漏电流随中子注量的退化曲线, 可以看出, 反向栅电流随着辐射注量的增加而减小, 而且变化基本上成线性. 虽然器件被钝化了, 中子辐照也能在SiN钝化层中感生缺陷, 而且主要集中在SiN与AlGaIn接触的表面. 这些缺陷主要影响反向栅特性, 而且与电子和 γ 射线[7]不同, 因为中子直接与原子核发生核反应, 所以在材料内更易形成深陷阱缺陷或者缺陷络合物[8], 这些深陷阱一旦俘获反向栅电子, 电子就不容易出来, 所以此时的陷阱作用机制已经不是陷阱辅助隧穿了, 更主要的是深陷阱的去载流子效应. 另一方面这些电子的陷落对后续电子的运动也有一定的阻挠, 从而减少了栅电子的注入, 降低了反向栅泄漏电流. 因为钝化层中的缺陷引起了反向栅电流的减小, 而图9反向栅电流与辐射注量基本上成线性退化, 所以中子辐照在SiN钝化层感生的缺陷浓度跟辐射注量也成线性变化趋势.

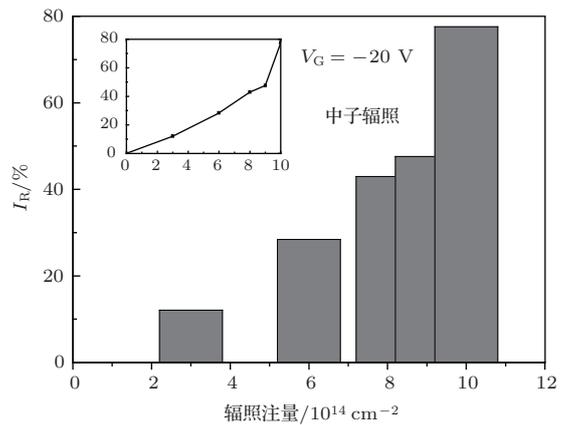


图9 反向栅泄漏电流 ($V_G = -20\text{ V}$) 随中子注量的退化

辐照后, 我们研究了HEMT器件的室温退火特性. 从上面的讨论可以看出, 中子辐照主要引起了膝点电压附近的转移特性退化和反向栅特性的退化, 所以下面也重点研究这两者的退火情况. 图10(a)和(b)分别给出了不同退火时间下膝点电压附近的转移特性和反向栅特性. 可以看出, 实验中没有出现明显的退火恢复现象, 而且器件特性还有接着退化的趋势. 这与以往的研究结果完全不同[12], 以前的实验结果都表明, 辐照后退火基本上都有较明显的恢复现象. 我们认为退火的不同结果可能由以下两个原因造成, 一方面 γ 射线和电子辐照造成的损伤一般比中子的容易恢复[13], 中子辐照中往往感生深能级, 也会产生工艺中难以生成的缺陷簇等缺陷络合物, 而且辐射过程中生成的点缺

陷在室温退火时容易与材料本身的缺陷结合成缺陷复合体,使得器件特性进一步退化;另一方面,不同的器件样品和实验条件都可能产生不同的实验结果,总之中子造成的损伤比其他粒子的难恢复.

以上的研究表明, SiN 钝化层可以有效地阻止电子陷落在表面态中,从而降低辐照引起的二维电子气耗尽,钝化层屏蔽了绝大部分的辐照损伤.同时也说明我们的器件抗中子辐照容限很高.

感谢西安电子科技大学张进成教授和西北核技术研究所郭红霞研究员在辐射实验和器件测试方面提供的帮助.

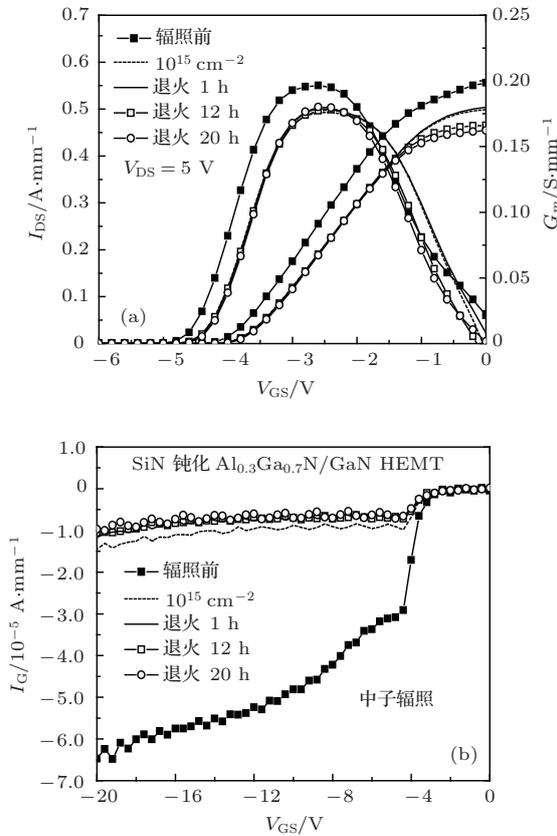


图 10 (a) 膝点电压附近的转移特性; (b) 反向栅特性随退火时间的变化

4 结 论

以上实验结果表明,中子辐照下饱和区特性基本没有退化,中子注量高达 10^{15} cm^{-2} 时,膝点电压附近的转移特性和器件的反向栅特性才开始明显减小,但是此过程中,器件的阈值电压几乎没变.此外没有发现任何退火恢复,而且器件特性还有继续退化的趋势.经过分析发现辐照在 SiN 钝化层中引入的缺陷引起了膝点电压附近漏电流和反向栅泄漏电流的减小.

参考文献

- [1] Simin G, Hu X, Ilinskaya N, Zhang J, Tarakji A, Kumar A, Yang J, Asif Khan M, Gaska R, Shur M S 2001 *IEEE Electron Dev. Lett.* **22** 53
- [2] Daumiller I, Theron D, Gaquiere C, Vescan A, Dietrich R, Wieszt A, Leier H, Vetury R, Mishra U K, Smorchkova I P, Keller S, Nguyen N X, Nguyen C, Kohn E 2001 *IEEE Electron Dev. Lett.* **22** 62
- [3] Look D C, Reynolds D C, Hemsley J W, Sizelove J R, Jones R L, Molnar R J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2273
- [4] Luo B, Johnson J W, Ren F, Allums K K, Abernathy C R, Pearton S J, Dwivedi R, Fogarty T N, Wilkins R, Dabiran A M, Wowchack A M, Polley C J, Chow P P, Baca A G 2002 *J. Electron. Mater.* **31** 437
- [5] Hu X, Choi B K, Barnaby H J, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Shojah-Ardalan S L S, Wilkins R, Mishra U K, Dettmer R W 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 293
- [6] McClory J W 2008 *Ph. D. Dissertation* (Alabama: Air University)
- [7] Gu W P, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H, Hao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1161 (in Chinese)[谷文萍, 张进成, 王冲, 冯倩, 马晓华, 郝跃 2009 物理学报 **58** 1161]
- [8] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, Markov A V, Pearton S J, Kolin N G, Merkurisov D I, Boiko V M 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 033529
- [9] Zhang M L, Wang X L, Xiao H L, Wang C M, Ran J X, Hu G X 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1045
- [10] McClory J W, Petrosky J C, Sattler M, Jarzen T A 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1969
- [11] Xue F S 2007 *Nanoelectron. Dev. Technol.* **11** 1671 (in Chinese) [薛舫时 2007 纳米器件与技术 **11** 1671]
- [12] Cai S J, Tang Y S, Li R, Wei Y Y, Wang K L 2000 *IEEE Trans. Electron Dev.* **47** 304
- [13] Wilson R G, Pearton S J, Abernathy C R, Zavada J M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2238

Effect of neutron irradiation on the electrical properties of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors*

Gu Wen-Ping^{1)2)†} Zhang Lin¹⁾ Li Qing-Hua¹⁾ Qiu Yan-Zhang¹⁾
Hao Yue²⁾ Quan Si¹⁾ Liu Pan-Zhi¹⁾

1) (School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

2) (Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 15 October 2013; revised manuscript received 1 November 2013)

Abstract

SiN-passivated AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors (HEMTs) are exposed to 1 MeV neutron at fluences up to 10^{15} cm⁻². The device shows a negligible degradation at neutron fluences below 10^{14} cm⁻², while the gate leakage current (I_g) slightly changes (the forward I_F increases, the reverse I_R decreases.) at low fluencies and the I_R degrades dramatically at fluences higher than 10^{14} cm⁻². Moreover, near the knee voltage, the transconductance decreases at fluences up to 10^{15} cm⁻², but the Schottky characteristics become degraded after neutron irradiation. And the 20-hour annealing results do not show any significant annealing recovery effect at room temperature, while the parameters also continues to degrade a little. Therefore, the drain current (near the knee voltage) and the I_F degradation of SiN-passivated AlGa_N/Ga_N HEMT can be attributed to the irradiation induced defects in SiN passivation layers, demonstrating that the effectiveness of the SiN layer in passivating surface state in the source-gate spacer and gate-drain spacer is undiminished by neutron irradiation. And the Ohmic contact is so relatively robust to neutron, but the Schottky characteristics degrade obviously. The annealing results prove that the damage induced by neutron may be recovered more difficultly. SiN-passivated AlGa_N/Ga_N HEMT appear to be an attractive candidate for space and terrestrial applications where resistance to displacement damage is required.

Keywords: AlGa_N/Ga_N HEMT, neutron-irradiation, defects, annealing

PACS: 72.80.Ey, 73.20.-r, 73.40.-c, 29.25.Dz

DOI: 10.7498/aps.63.047202

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 513270407, 61354), the Advanced Research Foundation of China (Grant Nos. 51311050112, 51308030102, 51308040301), the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China (Grant No. CHD2012JC095), and the Natural Science Foundation of Shan'xi Province, China (Grant No. 2013JQ7028).

† Corresponding author. E-mail: wpgu@chd.edu.cn