

^{60}Co γ 射线辐射对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的影响*

谷文萍[†] 张进城 王 冲 冯 倩 马晓华 郝 跃

(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)

(2008 年 4 月 8 日收到, 2008 年 8 月 8 日收到修改稿)

采用 ^{60}Co γ 射线辐射源对非钝化保护的 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT)器件进行了 1 Mrad(Si) 的总剂量辐射, 实验发现辐射累积剂量越大, 器件尺寸越小, 器件饱和漏电流和跨导下降越明显, 同时辐射后器件栅泄漏电流明显增大, 而阈值电压变化很小. 对辐射前后器件的沟道串联电阻和阈值电压变化的分析表明, 辐射感生表面态负电荷的产生是造成 AlGaIn/GaN HEMT 器件电特性退化的主要原因之一.

关键词: AlGaIn/GaN HEMT 器件, γ 射线辐射, 表面态

PACC: 6180E, 7280E, 7360L, 7320

1. 引 言

由于 AlGaIn/GaN 异质结构材料具有宽禁带、高击穿场强、高饱和电子漂移速度、高热导率以及可形成高密度、高迁移率的二维电子气, 因此基于该材料的高电子迁移率晶体管(HEMT 器件)在高温、高频和大功率电子器件方面极具应用前景, 受到广泛的关注和研究^[1-3]. 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^[4,5], 因此 AlGaIn/GaN HEMT 器件也具有出色的抗辐射特性. AlGaIn/GaN HEMT 器件结合了优越的抗辐射和出色的微波功率、高温、高压等特性, 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.

然而, 虽然理论上 AlGaIn/GaN HEMT 器件的抗辐射特性很强, 但是由于受到目前材料质量、器件工艺水平以及材料与器件结构等因素的影响, AlGaIn/GaN HEMT 器件的抗辐射特性还远远没有体现出 GaN 基材料的优势. 同时由于 AlGaIn/GaN 异质结构材料和 HEMT 器件在结构、载流子产生机制和载流子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 AlGaIn/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 AlGaIn/GaN HEMT 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得到关注^[6-8]. 2002 年美国康奈尔大学 Vituserich 等^[9]研究了 γ 射线辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能的影响, 发现辐射剂量相对较小(10^5 rad)时器件参数就发生明显变化, 所有器件的跨导均减小, 阈值电压均变负. 虽然有关 AlGaIn/GaN HEMT 器件的 γ 射线辐射研究已有报道^[6,9-11], 但是受 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构、材料质量和器件工艺等因素的影响, γ 射线辐射引起的器件退化呈现复杂的现象, 需要开展更多的实验研究, 特别是需要对其辐射退化和损伤机制进行深入研究.

本文采用平均能量为 1.25 MeV 的 ^{60}Co γ 射线对非钝化保护的蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行辐射试验, 测量分析了不同尺寸器件辐射前后的直流特性, 研究了不同剂量 γ 射线辐射下 AlGaIn/GaN HEMT 器件饱和漏电流、阈值电压、峰值跨导和栅漏肖特基二极管特性等参数的退化规律, 讨论了其辐射退化的物理机理.

2. 器件制造和辐射实验

采用自主研制的 3 片 2 英寸低压立式金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备进行 AlGaIn/GaN 异

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60736033)和预先研究项目(批准号: 51311050112, 51308030102, 51308040301)资助的课题.

[†] E-mail: wpgu@yahoo.cn

质结构材料生长. 在单面抛光(0001)面蓝宝石衬底上, 首先在 550℃ 下生长约 30 nm 厚的 AlN 缓冲层, 接着升温至 1040℃ 生长 1.5 μm 未掺杂 GaN 外延层和 23 nm 厚 AlGaIn 势垒层. AlGaIn 势垒层由 6 nm 未掺杂 AlGaIn 层、10 nm Si 掺杂(Si 掺杂浓度约为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)AlGaIn 层和 7 nm 未掺杂 AlGaIn 层组成. 所有 AlGaIn 层 Al 的摩尔组分均为 30%. 室温霍尔效应测量显示该异质结构材料方块电阻为 $308 \Omega/\square$, 电子迁移率为 $1570 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 电子面密度为 $1.29 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 为了研究非钝化保护的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的辐射机理, HEMT 器件制造工艺由台面刻蚀隔离、源漏欧姆、栅肖特基接触和加厚电极等步骤组成. 台面刻蚀隔离采用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀, 刻蚀深度约为 150 nm. 器件源漏欧姆接触采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au(20 nm/120 nm/55 nm/45 nm)多层金属, 在 830℃ 下氮气气氛中快速热退火 30 s. 栅肖特基接触采用电子束蒸发 Ni/Au(20 nm/200 nm)形成. 研究选用的 AlGaIn/GaN HEMT 器件均未钝化, 有两种栅长 0.8 μm 和 1 μm, 栅宽为 60 μm, 源漏间距为 4 μm, 栅极处于源漏间正中央.

AlGaIn/GaN HEMT 器件的辐射实验是在 ^{60}Co γ

射线源上进行的. 辐射时环境温度为室温, γ 射线平均能量为 1.25 MeV, 辐射总剂量为 1 Mrad(Si).

采用 HP4156B 精密半导体参数分析仪在室温下测试辐射实验前后器件的直流特性. 辐射完成后 30 分钟内进行器件特性测试.

3. 实验结果与分析

图 1 给出了 AlGaIn/GaN HEMT 器件在 1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射前后的输出特性和转移特性曲线. 图中 V_d 代表漏压, I_d 代表漏电流, g_m 代表跨导, L_g 和 W_g 分别代表器件的栅长和栅宽, 以下各图中也一样. 由图 1(a)可以看出, 低栅压时饱和和漏电流退化很小, 栅压为 -1, -2 和 -3 V 时辐射前后输出特性几乎没有变化, 但是栅压较高时(0 V 和 1 V)饱和漏电流发生了较明显的退化. 图 1(b)的转移特性也呈现相同的规律. 由图 1(b)可得辐射后 $V_g = 1 \text{ V}$ 时饱和漏电流下降了 15%, 峰值跨导减小了 9.1%. 但是从图 1(b)也可以看出, 辐射前后器件阈值电压几乎没有发生明显变化, 这与 Luo 等^[6]得出的辐射后器件阈值电压变负的结论有所不同.

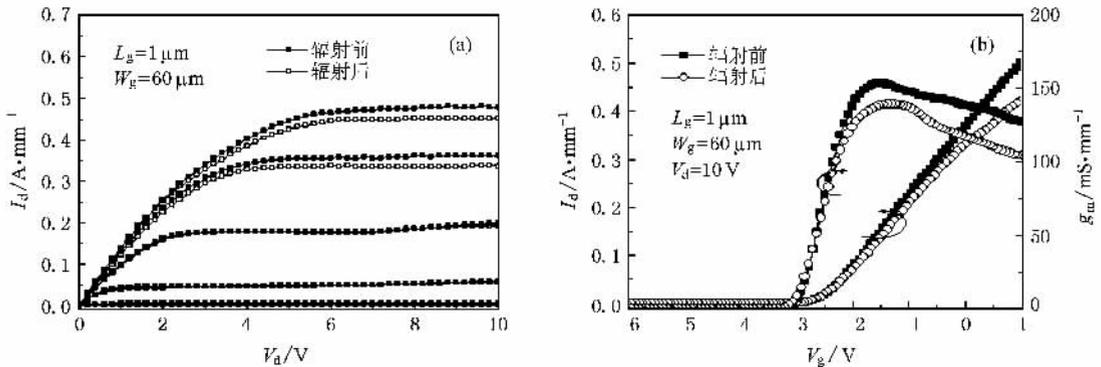


图 1 1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射前后 HEMT 器件的输出特性(a)和转移特性(b). 输出曲线中从上到下栅压(V_g)分别对应 1 V, 0 V, -1 V, -2 V, -3 V

图 2 给出了饱和漏电流的变化量 ΔI_{ds} 和峰值跨导变化量 $\Delta g_{m\max}$ 随辐射剂量的退化规律. 由图 2 可见, 累积辐射剂量越大, 饱和漏电流和峰值跨导退化量越大, 而且饱和漏电流的退化量比跨导退化量大. 图 3 给出了 1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射前后两种不同栅长 HEMT 器件转移特性的变化. 由图 3 可以看出, 栅长越小, 器件参数相对退化越严重.

图 4 给出了 AlGaIn/GaN HEMT 器件在 1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射前后栅漏肖特基二极管正向特性和反向特性的变化. 由图 4 可以看出, 辐射后栅正向电流明显增大, 而且栅反向泄漏电流也明显增强, 这与以前报道的 γ 射线辐射后栅泄漏电流明显减小^[6]呈现不同的结果.

综上所述, 随着 γ 射线辐射剂量的增大, 饱和漏

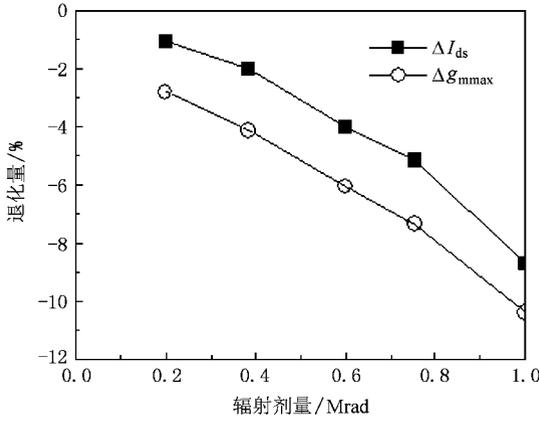


图2 ΔI_{ds} 和 Δg_{mmax} 随辐射剂量的退化

4. 辐射退化机制分析

Fan 等^[11]已经报道了 300 Mrad ⁶⁰Co γ 射线辐射对 AlGaIn/GaN HEMT 器件 2DEG 输运特性的影响,认为辐射后的器件退化主要是由于异质结辐射感生界面态电荷的作用. Luo 等^[6]也报道了 600 Mrad ⁶⁰Co γ 射线辐射对 AlGaIn/GaN HEMT 器件直流特性的影响,发现即使在 300 Mrad 时器件直流特性退化也很微弱,认为大辐射剂量(600 Mrad)下,由于辐射引入了深能级电子陷阱,这些陷阱缺陷的去载流子效应使得辐射后器件饱和和漏电流和跨导峰值下降了 30%左右. 而 Umana-Membreno 等^[10]通过深能级瞬态谱(DLTS)的测量发现辐射引入的深能级受主缺陷是造成器件参数退化的主要原因. 根据以上文献报道,我们可以看出,由于 AlGaIn 和 GaN 材料具有很强的化学键和很高的辐射阈能^[4,5],所以通常只有上百 Mrad 的 γ 射线辐射总剂量才能引起数量较多的异质结辐射感生界面态和辐射感生深陷阱,使得 AlGaIn/GaN HEMT 器件的特性发生明显退化.

但是本文的研究结果表明, γ 射线辐射总剂量 1 Mrad 就引起了饱和漏电流和峰值跨导的明显退化. 界面态和陷阱电荷的产生因辐射总剂量很低,所以产生的量很少,不足以引起器件明显的退化,它们的影响几乎是可以忽略的. 我们认为,本文 1 Mrad 辐射实验引起器件特性退化主要归因于表面态负电荷的增加. 在 γ 射线辐射下,源、漏和栅电极下方由于金属层的屏蔽效应而几乎没有受到辐射的影响,但是未钝化的栅源和栅漏间隔区直接暴露在 γ 射线辐射下,产生了表面态负电荷,这些表面态负

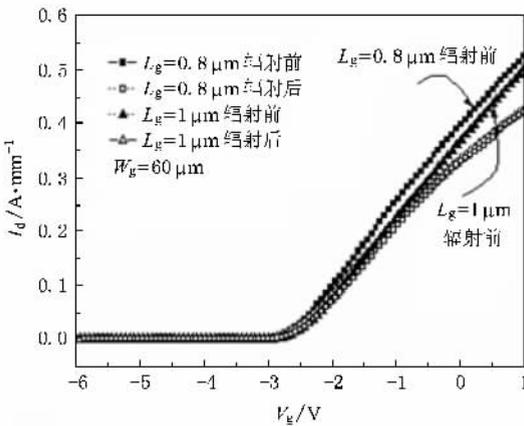


图3 1 Mrad ⁶⁰Co γ 射线辐射前后不同栅长器件转移特性的变化

电流和峰值跨导不断减小,但是阈值电压几乎不变,而且辐射后栅漏二极管的正向和反向栅电流均增大.

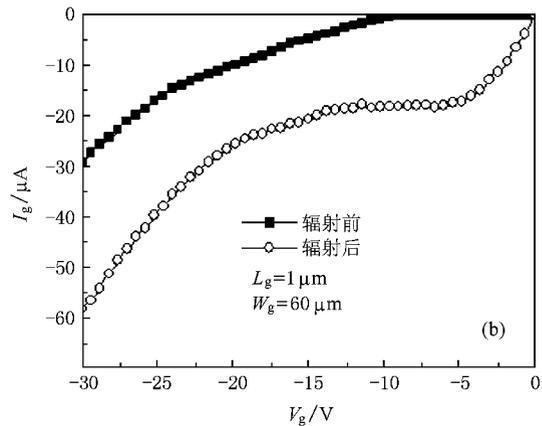
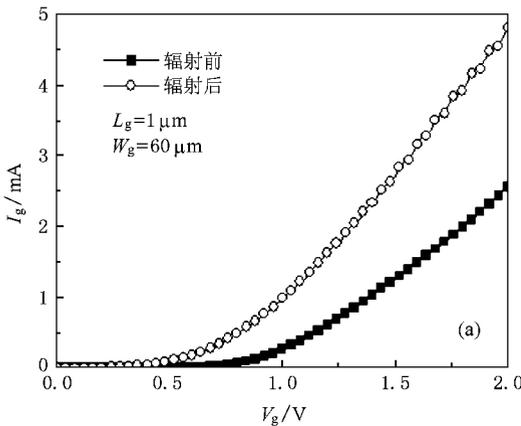


图4 1 Mrad ⁶⁰Co γ 射线辐射前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件栅漏二极管正向特性(a)和反向特性(b) 图中 I_g 是栅电流

电荷会对栅源和栅漏间隔区下方的二维电子气造成一定的耗尽作用,使得总的二维电子气密度(n_s)减小了。

在忽略了载流子扩散的贡献后,利用电流密度方程可得到沟道中的饱和漏电流为^[12]

$$I_{ds} = \frac{Wq\mu}{L} \int_{V_{th}}^{V_g} n_s(u) du, \quad (1)$$

式中, q 是电子电荷, W 是栅宽, L 是栅长, μ 为迁移率, V_g 为栅压, V_{th} 为阈值电压。

1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射后,由于表面态负电荷对栅源和栅漏间隔区下方二维电子气的耗尽作用,总的二维电子气密度(n_s)减小了,因此辐射后器件饱和漏电流有所减小。而从跨导的定义也很容易得出,随着饱和漏电流的减小跨导峰值也降低了,这从图 1 的输出和转移曲线上可以明显看出。

但是由于栅电极下方二维电子气密度没有受到辐射的影响,因此辐射前后阈值电压几乎没有发生变化。这也与转移曲线所表达的信息一致。而辐射诱生表面态负电荷使得栅漏间隔区沟道电阻 R_{gl} 和栅源间隔区沟道电阻 R_{gs} 有所增大,这使得器件漏源导通电阻增大,从而引起漏源饱和电流下降。由于栅压较低时(接近阈值电压),漏源导通电阻主要部分是栅下方沟道电阻,栅漏和栅漏间隔区下方沟道电阻在整个漏源导通电阻中所占比例较低,因此辐射诱生间隔区二维电子气退化对器件饱和漏电流的影响较小,但是当栅压较高时,栅下方沟道电阻较

小,栅漏和栅漏间隔区下方沟道电阻在整个漏源导通电阻中所占比例较高,因此辐射诱生间隔区二维电子气退化对器件饱和漏电流的影响较大。这可以解释图 1 中低栅压时饱和漏电流退化较小而高栅压时饱和漏电流退化较大这一现象。

由于栅源和栅漏间隔区表面态负电荷的产生大大增加了栅漏电极之间的表面漏电,从而使得栅漏二极管的正向和反向栅电流在辐射后均产生明显增大。这就解释了图 4 给出的 AlGaIn/GaN HEMT 器件在 1 Mrad ^{60}Co γ 射线辐射前后栅漏肖特基二极管正向特性和反向特性的变化。

图 3 中器件栅长越小,辐射退化量越大,这是因为器件栅长的减小使得栅漏和栅源间隔区面积增大,受到辐射影响的区域增大,因此辐射感生的表面态负电荷也越多,从而使得器件参数退化也越大。

5. 结 论

上述实验表明,1 Mrad(Si) ^{60}Co γ 射线辐射后,未钝化的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的饱和漏电流减小了 15%,跨导峰值下降了 9.1%,栅泄漏电流明显增强。而且通过不同剂量(0—1 Mrad)辐射发现,辐射剂量越大,饱和漏电流和跨导峰值退化越明显。分析表明,这种低剂量下的明显辐射退化主要是由于栅漏和栅源间隔区辐射感生表面态负电荷引起的。

- [1] Eastman L F, Tilak V, Smart J, Bruce M G, Eduardo M C, Dimtrov R, Kim H, Ambacher O S, Weimann N, Prunty T, Murphy M, Schaff WJ, Shealy J R 2001 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **48** 479
- [2] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, Parikh P, Keller B P, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Elec. Dev.* **48** 586
- [3] Sheppard S T, Doverspike K D, Pribble W L 1999 *IEEE Elec. Dev. Lett.* **20** 161
- [4] Khanna S M, Webb J, Tang H, Haudayer A J, Carlone C 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 2322
- [5] Look D C, Reynolds D C, Hemsley J W, Sizelove J R, Jones R L, Molnar R J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2273
- [6] Luo B, Johnson J W, Ren F, Allums K K, Abernathy C R, Pearton S J, Dabiran A M, Wowchack A M, Polley C J, Chow P P, Schoenfeld D, Baca A G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 604
- [7] 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 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2196
- [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 *Appl. Phys. Lett.* **98** 033529
- [9] Vituserich S A, Klein N, Belyaev A E 2002 *Mat. Res. Soc. Symp.* **719** F5.4.1
- [10] Umana-Membreno G A, Dell J M, Hessler T P, Nener B D, Parish G, Faraone L, Mishra U K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 4354
- [11] Fan L, Zhang J C, Li P X, Hao Y 2003 *Chin. J. Semiconduct.* **24** 937 (in Chinese) 范 隆、张进城、李培成、郝 跃 2003 半导体学报 **24** 937]
- [12] Rashmi S, Haldar S, Gupta R S 2001 *Microwave Opt. Tech. Lett.* **29** 117

Influence of ^{60}Co γ -ray irradiation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors *

Gu Wen-Ping[†] Zhang Jin-Cheng Wang Chong Feng Qian Ma Xiao-Hua Hao Yue

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

(Received 8 April 2008 ; revised manuscript received 8 August 2008)

Abstract

AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMT) unpassivated with different gate lengths are irradiated with ^{60}Co γ -rays to doses up to 1 Mrad (Si). The bigger the doses are and the smaller the gate length is , the greater the changes in drain current and transconductance are . While the gate leakage current is significantly increased after irradiation , the threshold voltage is relatively unaffected . By analysing the series resistance of channel and the threshold voltage , we find that irradiation induced electronegative surface state charges is one of the important reasons of radiation damage .

Keywords : AlGaIn/GaN HEMTs , ^{60}Co γ -rays irradiation , surface state

PACC : 6180E , 7280E , 7360L , 7320

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736033) and the Advanced Research Foundation of China (Grants Nos. 51311050112 51308030102 51308040301).

[†] E-mail : wpgu@yahoo.cn