

# 辐射感生应力弛豫对 $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 电学特性的影响\*

范 隆<sup>1)†</sup> 郝 跃<sup>2)</sup>

1) 北京时代民芯科技有限公司, 北京 100076)

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

(2006 年 4 月 3 日收到, 2006 年 11 月 16 日收到修改稿)

基于电荷控制原理建立了辐射感生  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  势垒层应力弛豫对  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 器件电学特性影响的解析模型, 并进行了仿真分析. 结果表明, 对于高 Al 组分 HEMTs 器件,  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  势垒层中辐射感生的应力弛豫影响更为显著. 辐射感生应力弛豫不但导致 2DEG 下降和阈值电压正向漂移, 而且能够引起漏极输出电流的明显下降. 辐射感生应力弛豫是匹配  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 辐射损伤的重要机理之一.

关键词:  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ , HEMT, 辐射损伤, 应力弛豫

PACC: 6180, 7280E, 7360L, 7320

## 1. 引 言

$\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 由于大的直接带隙和高饱和漂移速度, 大导带断续和高的热稳性成为了微波功率器件中最有吸引力的器件<sup>[1-4]</sup>种类, 近年来受到广泛关注和研究. 由于在高温、高压和高频方面的综合性能优势, GaN 基 HEMTs 将成为军事航天领域应用的极佳选择. 因此, 有必要研究了解其辐射损伤机理和特性退化规律.

区别于硅 MOSFET (金属-氧化物-半导体场效应晶体管) 和调制掺杂 MODFET (调制掺杂场效应晶体管) 结构的辐射损伤, 由于匹配 HEMTs 中应力引起的压电极化电场构成了对  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  异质结构中二维电子气 (2DEG) 量子限制的重要条件, 是形成高浓度 2DEG 的主要因素之一. 2DEG 的浓度强烈依赖于 AlGaIn 层的应力感生的极化电场强度. 因此,  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  和 GaN 间的晶格匹配在辐射作用下发生应力弛豫成为匹配 HEMTs 特有的辐射损伤模式. 实验已证实, 在质子辐射作用下, 匹配  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件异质结界面应力键断裂, 导致了界面应力释放, 发生应力弛豫的现象<sup>[5]</sup>. 但目前尚未从理论

上建立辐射感生应力弛豫影响 GaN 基 HEMTs 电学特性的模型. 本文针对辐射感生应力弛豫的影响, 基于电荷控制原理, 从理论上建模并仿真研究了不同弛豫程度下, 匹配 GaN 基 HEMTs 的电学特性退化规律.

本文在建模中, 引入了辐射感生应力弛豫度 (以下用  $r$  或  $r(D)$  表示,  $D$  代表辐射剂量) 作为描述辐射所造成的应力弛豫程度, 它与辐射剂量直接相关. 通过采用电荷控制模型, 建立了  $r$  与  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件极化感生电荷间影响关系, 并进一步得到  $r$  对器件 2DEG 阈值电压、输出特性、跨导的影响模型.

仿真实验中采用了与电场相关的迁移率模型和饱和漂移速度, 考虑了寄生源、漏电阻来计算 HEMTs 的输出特性, 并与已发表的结果进行了比较, 两者结果接近一致证实了我们提出模型的正确性.

## 2. 理论模型

### 2.1. 载流子浓度和阈值电压

模型中采用的  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 器件层结构示于图 1 中, 带有高薄层电荷密度的二维电子气在

\* 国家重点基础研究发展计划项目 (批准号 2002CB3119) 资助的课题.

† E-mail: meifan@yahoo.com.cn

Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N/GaN 异质结构中被强极化效应所感生. GaN 顶层为 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 的异质结构处在张应力下,总的极化电场是压电和自发极化电场的总和.由 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 和 GaN 层间的极化梯度在 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N/GaN 界面感生出了正电荷 σ<sub>pol</sub>,自由电子趋向于在界面累积,于是形成了一个导电沟道.结合压电效应,由基本电荷控制方程可获得在 n-Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N/GaN 异质界面的 2DEG 薄层密度为<sup>[6]</sup>

$$n_s(m, r) = \frac{\epsilon(m)}{q(d_d + d_i + \Delta d)} \times (V_{gs} - V_{th}(m, r) - V_c(x)), \quad (1)$$

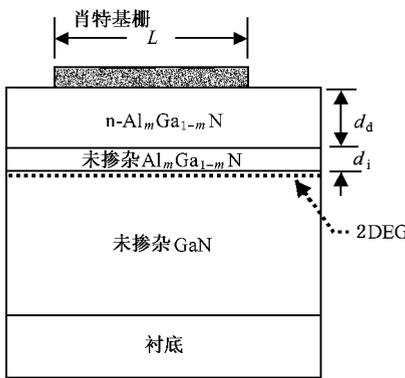


图 1 用于分析辐射感生应力弛豫效应的 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N/GaN HEMT 结构示意图

这里  $q$  是电子电荷,  $m$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 中 Al 的组份,  $\epsilon(m)$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 介电常数,  $d_d$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 层厚度,  $d_i$  是空间隔离层厚度,  $\Delta d$  是 2DEG 的有效厚度, 是二维薄层载流子浓度  $n_s$  的函数, 精确的表达形式为  $\Delta d = \frac{1}{n_s} \int z \cdot n(z) \cdot dz$ , 根据 Ruden 等对量子阱自治求解的结果, 在相当宽的  $n_s$  范围内 ( $2 \times 10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ),  $\Delta d$  在  $2.0 \pm 1.0 \text{ nm}$  范围内<sup>[7]</sup>, 为简化计算, 我们在模拟时取其平均值  $2.0 \text{ nm}$ .  $V_{gs}$  是偏置的栅-源电压.

$V_c(x)$  是在栅下沟道方向  $x$  处由于漏电压造成沟道的电势降,  $V_{th}(m, r)$  是器件与极化弛豫度相关的阈值电压, 由下式表达<sup>[6]</sup>:

$$V_{th}(m, r) = V_{th0}(m) - \frac{\sigma_{pol}(m, r)}{\epsilon(m)} (d_d + d_i), \quad (2)$$

上式中第 1 项定义为无极化常规 HEMT 的阈值电压, 即

$$V_{th0}(m) = \phi_m(m) - \Delta E_c(m) - \frac{qN_d d_d^2}{2\epsilon(m)}, \quad (3)$$

这里  $\phi_m(m)$  是肖特基势垒高度,  $\Delta E_c(m)$  是在 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 和 GaN 间导带不连续.  $N_d$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 层掺杂密度. 方程 (2) 的第 2 项代表压电和自发极化效应对阈值电压的贡献.

在有应力弛豫下, 极化感生薄层电荷密度,  $\sigma_{pol}(m, r)$  定义为

$$\sigma_{pol}(m, r) = \sigma_{pseudo}(m) - \sigma_{rel}(m, r), \quad (4)$$

此处  $\sigma_{pseudo}(m)$  是完全匹配(应力)器件的极化感生薄层电荷密度, 定义为

$$\sigma_{pseudo}(m) = 2 \left( \frac{a(0) - a(m)}{a(m)} \right) \times \left( e_{31}(m) - e_{33}(m) \frac{C_{13}(m)}{C_{33}(m)} \right) + p_{sp}(m) - p_{sp}(0), \quad (5)$$

这里,  $a(m)$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 晶格常数,  $e_{31}(m)$  和  $e_{33}(m)$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 压电常数,  $C_{31}(m)$  和  $C_{33}(m)$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 弹性常数.  $P_{sp}(m)$  是 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 自发极化强度. 方程 (4) 的第 2 项定义为 Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N 势垒层由于辐射感生应力弛豫对极化感生电荷密度的影响. 与辐射感生应力弛豫相关的压电极化感生电荷密度的减小  $\sigma_{rel}$  可由下式给出:

$$\sigma_{rel}(m, r) = 2r(D) \left( \frac{a(0) - a(m)}{a(m)} \right) \times \left( e_{31}(m) - e_{33}(m) \frac{C_{13}(m)}{C_{33}(m)} \right) \quad (6)$$

这里,  $r(D)$  定义为辐射引起的势垒层应力弛豫度, 它是辐射剂量 ( $D$ ) 的函数.

从上述导出公式可以发现,  $n_s$  和  $V_{th}$  均受到应力弛豫度  $r(D)$  的线性影响, 随着辐射感生弛豫度的增加, 载流子浓度线性下降, 阈值电压线性增加. 这一线性变化关系是因为压电极化电场与应力弛豫度呈线性关系的缘故. 而实验表明 AlGa<sub>n</sub>/GaN HEMT 的  $n_s$  和  $V_{th}$  随辐射剂量具有单调的变化关系, 因此, 我们认为势垒层应力弛豫度与辐射剂量间应具有如下关系形式,  $r(D) \propto D^n$ . 其中  $n$  是与辐射粒子类型和能量相关的参数, 取值在 0—1 间.

因此, 用方程 (3)—(4) 代入方程 (2), Al<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N/GaN HEMT 极化相关的阈值电压能表示为

$$V_{th}(m, r) = V_{thpseudo}(m) + V_{threl}(m, r), \quad (7)$$

上式中第 1 项

$$V_{thpseudo}(m) = [V_{th0}(m) - (\sigma_{pseudo}(m) / \epsilon(m)) \times (d_d + d_i)], \quad (8)$$

是完全应力结构的阈值电压, 第 2 项

$$V_{\text{threl}}(m, r) = ((\sigma_{\text{rel}}(m, r)\epsilon(m)) \cdot (d_d + d_i)), \quad (9)$$

是辐射感生应力弛豫引起的阈值电压变化。

仿真实验中采用的与 Al 组份相关的材料参量在下表 1 中定义。

表 1  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 中与 Al 组份相关的物理参量

参数	表达式	单位
$\epsilon(m)$	$(-0.5m + 9.5) \times 8.854 \times 10^{12}$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$
$\mathcal{K}(m)$	$1.3m + 0.84$	eV
$\Delta E_c(m)$	$0.7\{6.13m + 3.4\{1 - m\} - m\{1 - m\}\} - 3.42$	eV
$C_{13}(m)$	$5m + 103$	GPa
$C_{33}(m)$	$-32m + 405$	GPa
$\alpha(m)$	$(-0.077m + 3.189) \times 10^{-10}$	m
$e_{31}(m)$	$-0.11m - 0.49$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$
$e_{33}(m)$	$0.73m + 0.73$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$
$P_{\text{sp}}(m)$	$-0.052m - 0.029$	$\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$

## 2.2. 电流-电压特性

沟道中漏电流从电流密度方程得到, 即<sup>[6]</sup>

$$I_{\text{ds}}(m, r) = Wq\mu_0 n_s(m, r) \cdot \left( \frac{\frac{dV_c(x)}{dx}}{1 + \frac{1}{E_1} \frac{dV_c(x)}{dx}} \right), \quad (10)$$

式中  $W$  是栅宽,  $\mu_0$  是低场电子迁移率,  $E_1$  是与临界电场  $E_c$  和饱和漂移速度相关的电场, 具体形式如为  $E_1 = E_c \{ (\mu_0 E_c / v_{\text{sat}}) - 1 \}$ . 方程(10)中的分母代表迁移率的场相关性<sup>[8]</sup>. 将方程(1)代入方程(10), 我们得到

$$\begin{aligned} & I_{\text{ds}}(m, r) \left( 1 + \frac{1}{E_1} \frac{dV_c(x)}{dx} \right) \\ &= \frac{W\mu_0 \epsilon(m)}{(d_d + d_i + \Delta d)} \{ V_{\text{gs}} - V_{\text{thpseudo}}(m) - V_c(x) \} \\ & \times \frac{dV_c(x)}{dx} + \frac{W\mu_0 \epsilon(m)}{(d_d + d_i + \Delta d)} \\ & \times (-V_{\text{threl}}(m, r)) \frac{dV_c(x)}{dx}. \quad (11) \end{aligned}$$

利用边界条件,  $V_c(x)|_{x=0} = I_{\text{ds}}(m)R_s$  和  $V_c(x)|_{x=L} = V_{\text{ds}} - I_{\text{ds}}(m)R_d$ , 在整个栅长  $L$  范围内积分(这里  $R_s$  和  $R_d$  分别是寄生源极和漏极电阻), 得到线性区  $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$  方程解析表达式为

$$I_{\text{ds}}(m, r)$$

$$= \frac{-\eta_2(m, r) + \sqrt{\eta_2(m, r)^2 - 4\eta_1(m)\eta_3(m, r)}}{2\eta_1(m)}, \quad (12)$$

此处令

$$\lambda = \frac{W \cdot \mu_0 \cdot \epsilon(m) \cdot E_c}{(d_d + d_i + \Delta d)}, R = R_s + R_d,$$

则(12)式中各项为

$$\left. \begin{aligned} \eta_1(m) &= \lambda \cdot \frac{(R_d^2 - R_s^2)}{2} - (R_s + R_d), \\ \eta_2(m, r) &= L \cdot E_c + V_{\text{ds}} + \lambda \\ & \times (R \cdot V_{\text{gs}} - R \cdot V_{\text{threl}}(m, r)) \\ & - \lambda \cdot R_d \cdot V_{\text{ds}}, \\ \eta_3(m, r) &= \lambda \cdot \left( \frac{V_{\text{ds}}^2}{2} - V_{\text{ds}}(V_{\text{gs}} - V_{\text{threl}}(m, r)) \right). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

采用  $\mu_0 E_c$  作为电流开始出现饱和的速度, 饱和和漏电流由方程(1)和(10)得到, 即

$$\begin{aligned} & I_{\text{ds, sat}}(m, r, V_{\text{gs}}) \\ &= \lambda \cdot (V_{\text{gs}} - V_{\text{threl}}(m, r) - V_{\text{ds, sat}}(m, r)), \quad (14) \end{aligned}$$

这里,  $V_{\text{ds, sat}}$  是漏极饱和电压. 通过在方程组(13)中用  $V_{\text{ds, sat}}$  代替  $V_{\text{ds}}$ , 再代入式(12)中也能得到饱和漏电流. 联列  $I_{\text{ds, sat}}$  的这两个表达式以保证在线性和饱和区间电流的连续性, 可得到

$$\begin{aligned} & V_{\text{ds, sat}}(m, r, V_{\text{gs}}) \\ &= \frac{-\zeta_2(m, r) - \sqrt{\zeta_2(m, r)^2 - 4\zeta_1(m) \cdot \zeta_3(m, r)}}{2\zeta_1(m)}, \quad (15) \end{aligned}$$

上式中参量分别为

$$\begin{aligned} \zeta_1(m) &= 2\eta_1(m) \cdot \lambda + 2\lambda \cdot R_d - 1, \\ \zeta_2(m, r) &= -(2\lambda \cdot R_d + 2\lambda \cdot R + 4\lambda \cdot \eta_1(m)) \\ & \times (V_{\text{gs}} - V_{\text{threl}}(m, r)) - 2L \cdot E_c, \\ \zeta_3(m, r) &= 2L \cdot E_c \cdot (V_{\text{gs}} - V_{\text{threl}}(m, r)) \\ & + (2\lambda \cdot R + 2\lambda \cdot \eta_1(m)) \\ & \times (V_{\text{gs}} - V_{\text{threl}}(m, r))^2. \end{aligned}$$

器件的漏饱和电流可通过将方程(15)代入方程(14)中得到。

## 2.3. 跨导 $G_m$

跨导是衡量输入栅电压变化时, 漏电流(drain current)变化的物理量. 这个值越大, 晶体管操作速度越快. 跨导参数值越高, 意味着晶体管的运行速度越快, 提高跨导还是降低器件噪声的一个重要途径。

因此器件的跨导是一个重要的微波参数.  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 的跨导可从方程(14)中对饱和漏电流求导得到,即

$$G_m(m, r) = \left. \frac{\partial I_{ds, \text{sat}}(m, r, V_{gs})}{\partial V_{gs}} \right|_{V_{DS} > V_{D, \text{sat}}} \quad (16)$$

### 3. 结果和讨论

图 2(a) 和 (b) 分别显示了  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  势垒层掺

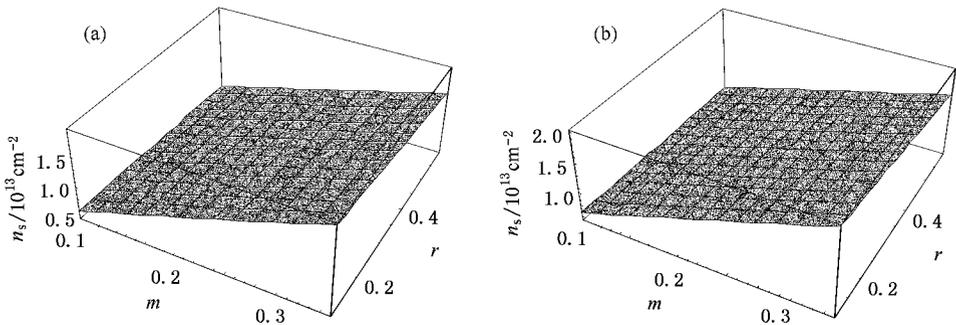


图 2 2DEG 浓度在不同 Al 组份下随辐射感生应力弛豫度  $r$  的变化 (a) 未掺杂,  $d_d = 20.0 \text{ nm}$ ,  $d_i = 3.0 \text{ nm}$ ,  $\Delta d = 2.0 \text{ nm}$ ,  $N_d = 0$ ; (b) 掺杂,  $d_d = 20.0 \text{ nm}$ ,  $d_i = 3.0 \text{ nm}$ ,  $\Delta d = 2.0 \text{ nm}$ ,  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

为更清楚说明应力弛豫度对 2DEG 浓度的作用, 在图 3 中我们给出了四个弛豫度下,  $n_s$  随  $m$  的二维变化关系. 作为对比, 图中同时标出了若干个实验结果. 图中的实验结果取自文献 [9] 中报道的不同 Al 组分 HEMT 器件实测的  $n_s$  结果. 可见, 实验结果几乎都分布于理论计算值的范围之内, 说明我们的弛豫模型是正确的. 对于相对较大的 Al 组份, 辐射感生弛豫度增加对减少  $n_s$  的作用更强.

图 4(a) 和 (b) 中分别给出了由辐射感生应力弛豫引起的阈值电压变化  $V_{\text{threl}}$  和总的阈值电压  $V_{\text{theff}}$  随 Al 组份  $m$  和弛豫度  $r$  的三维变化关系. 可以看到, 随着  $r$  的增加,  $V_{\text{threl}}$  增加, 并且在  $m$  较大时,  $V_{\text{threl}}$  的增加越大. 从模型中  $V_{\text{threl}}$  的定义知道, 这一变化是由于应力弛豫引起的极化电荷变化  $\sigma_{\text{rel}}$  的增加引起的. 作为结果, 如图 4(b) 所示, 总的 HEMT 阈值电压  $V_{\text{theff}}$  也随着  $r$  的增加所引起  $\sigma_{\text{rel}}$  的增大而正向漂移.

图 5(a) (b) 和图 6(a) (b) 给出了两种 Al 组份  $m = 0.2$  和  $m = 0.4$  的赝配  $\text{n-Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 的电流-电压特性. 由于 GaN 优异的输运性质和 GaN 基 HEMT 器件中增强的电荷限制作用, 器件显示出了 3—6 A/mm 的高电流能力. 漏电流随  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$

杂与未掺杂情况下, 2DEG 浓度  $n_s$  与 Al 组份  $m$  和辐射感生应力弛豫度  $r$  的三维变化关系. 从图中  $n_s$  的变化可见, 随着辐射感生应力弛豫度  $r$  的增加,  $n_s$  线性下降, 并且在相对较高的 Al 组份结构中, 这一效应更加明显. 结果还显示, 掺杂与未掺杂器件中, 除  $n_s$  的变化幅度不同外,  $n_s$  随  $m$  和  $r$  的变化关系是完全一致的.

上述结果说明势垒掺杂的情况不影响辐射感生应力弛豫对二维薄层载流子浓度的退化作用.

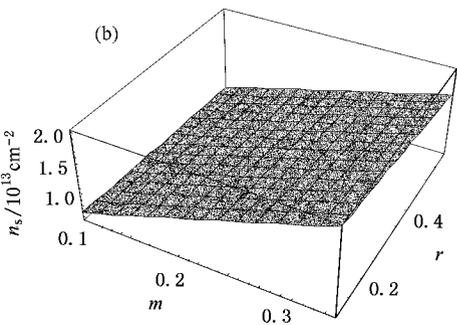


图 3 理论计算的应力弛豫度  $r$  对  $n_s$ - $m$  关系的影响. 图中标出了部分实验结果

层 Al 组份明显增加归因于 2DEG 密度的增加.

从图 5 和图 6 中可见, 在辐射作用下,  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  层发生部分应力释放后, 器件给出的实际电流明显小于未辐射的应力器件所预计的值. 图 5(a) 和图 6(a) 中给出的输出特性结果是从应力弛豫度  $r$  为 0 和 0.2 的情况下计算得到的. 可见对于不同栅电压, 漏电流下降的程度是不同的, 栅电压越接近阈值, 饱和漏电流相对下降得越大. 对于  $r = 0$  的结果, 我们与

Sacconi 等采用自洽解 Schrödinger-Poisson 方程计算二维层载流子浓度后网格划分数值求解得到的  $I-V$

结果<sup>[10]</sup>(图中圆点标记的结果)相比是非常一致的,因此,证明了我们所采用模型的正确性.

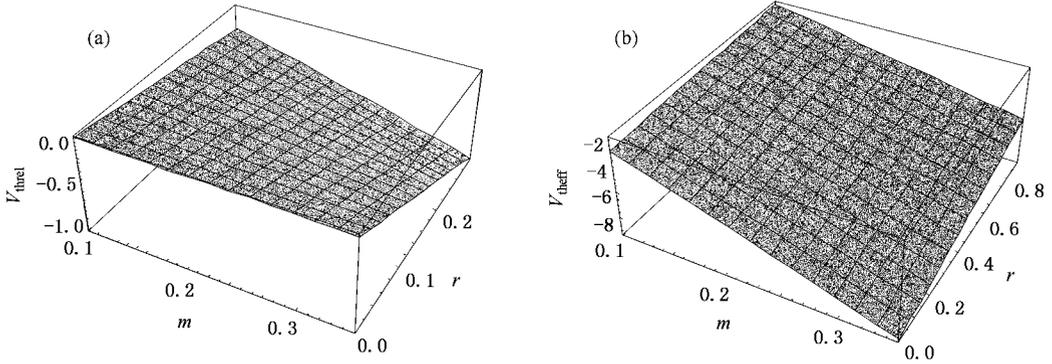


图 4 辐射感生应力弛豫引起的阈值电压变化(a)和与应力弛豫相关的总阈值电压(b)与 Al 组份  $m$  和应力弛豫度  $r$  的三维变化关系 (a) 掺杂  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $d_d = 20.0 \text{ nm}$ ,  $d_i = 3.0 \text{ nm}$ ,  $\Delta d = 2.0 \text{ nm}$ ; (b) 掺杂  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $d_d = 20.0 \text{ nm}$ ,  $d_i = 3.0 \text{ nm}$ ,  $\Delta d = 2.0 \text{ nm}$

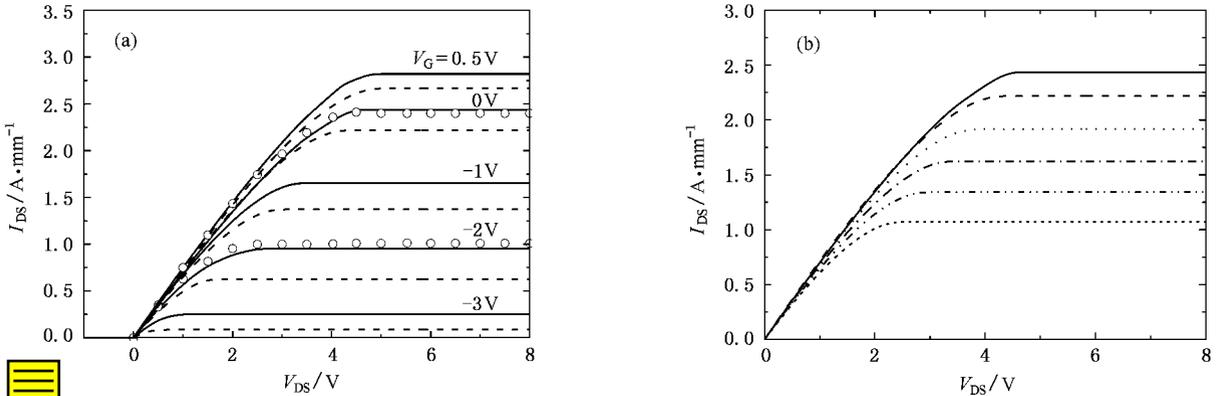


图 5 辐射感生应力弛豫对  $Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN$  HEMT 的输出特性的影响 (a) 辐照前无弛豫与辐照后发生应力弛豫 ( $r = 0.2$ ) 的对比,  $\circ$  文献<sup>[10]</sup> 结果; — 辐照前无弛豫; - - - 辐射后,  $r = 0.2$ ;  $m = 0.2$ ;  $d_d = 15.0 \text{ nm}$ ;  $d_i = 5.0 \text{ nm}$ ;  $L = 0.3 \mu\text{m}$ ;  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ;  $E_c = 150 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;  $\mu_{00} = 1100 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (b)  $V_G = 0$  的输出特性与弛豫度  $r$  的关系,  $V_G = 0$ ,  $m = 0.2$ , — 示辐照前无弛豫, 虚线为辐照后, 其中 - - - 示  $r = 0.2$ ; ... 示  $r = 0.4$ ; - . . . 示  $r = 0.6$ ; . . . . 示  $r = 0.8$ ; . . . 示  $r = 1$

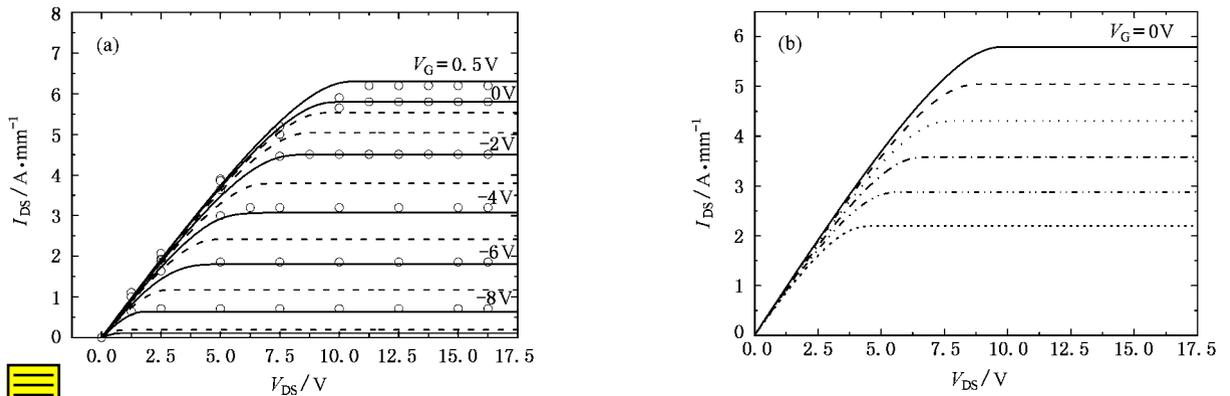


图 6 辐射感生应力弛豫对  $Al_{0.4}Ga_{0.6}N/GaN$  HEMT 的输出特性的影响 (a) 辐照前无弛豫与辐照后发生应力弛豫 ( $r = 0.2$ ) 的对比; (b)  $V_G = 0$  的输出特性与弛豫度  $r$  的关系,  $\mu_m = 0.4$ , 其余说明同图 5

从图 5(b) 和图 6(b) 可见, 随辐射感生应力弛豫度增加, 饱和漏电流线性下降, 当  $r$  为 0.8 时, 器件饱和漏电流下降了近 50%.

比较图 5 和 6 的结果, 显示出在同样的辐射感生应力弛豫度下, 对于较高的 Al 组份的器件而言, 所造成的饱和漏电流下降更大.

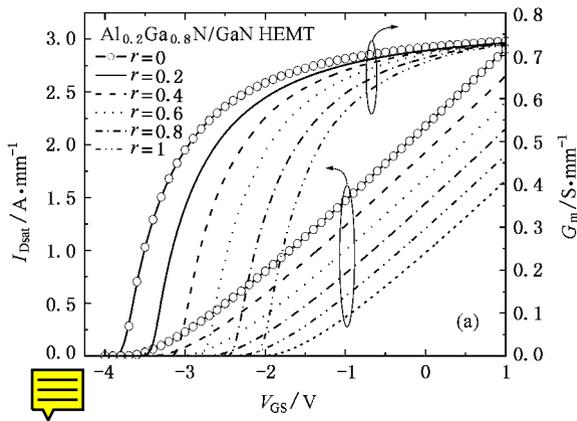


图 7 给出了两种 Al 组份 ( $m = 0.2$  和  $m = 0.4$ ) 的 HEMT 器件转移特性与辐射感生应力弛豫度的关系. 随辐射感生应力弛豫度的增加, 器件的  $I_{\text{Dsat}}-V_{\text{GS}}$  曲线都发生正向平移, 而最大跨导  $G_m$  却没有明显下降. 这反映出了辐射感生应力弛豫是通过造成器件阈值电压漂移来影响器件电流特性的结果.

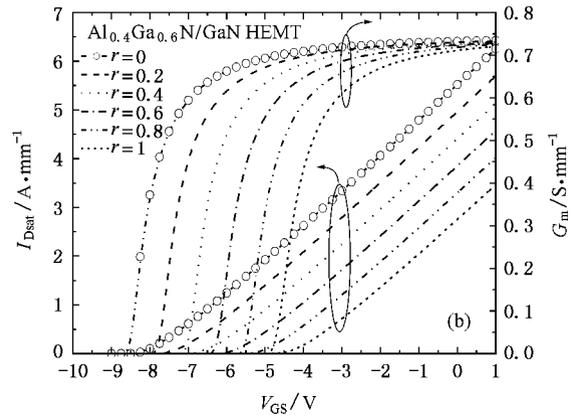


图 7  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 转移特性曲线与辐射感生应力弛豫度  $r$  的关系

## 4. 小 结

利用电荷控制原理提出了一个的解析模型研究辐射感生  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}$  势垒层应力弛豫对匹配  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 的 2DEG 层电荷密度, 阈值电压, 电流-电压特性和跨导的影响. 该模型仿真的结果与 Sacconi 等利用自洽解 Schrödinger-Poisson 方程数值求得的结果符合很好, 验证了模型的正确性.

仿真实验表明, 辐射感生应力弛豫对器件异质界面极化感生电荷的减少导致了器件二维薄层载流子浓度的下降和阈值电压的正向漂移. 特别是对于较高 Al 组分的器件这一变化更加明显. 从器件输出特性曲线随辐射感生应力弛豫度的下降可看出, 辐射引起的应力弛豫主要引起了漏极饱和电流的下降, 并且下降幅度与应力弛豫度成线性正比关系. 这

与器件二维载流子浓度随辐射感生力弛豫度的增加而线性下降的结果相一致. 对于器件转移特性的影响主要表现为造成了  $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$  的平移, 最大跨导并不受影响, 这与辐射感生应力弛豫是通过引起的器件阈值电压正向漂移进而影响器件漏电流的特性相一致. 从二维载流子浓度, 阈值电压和饱和漏电流随辐射感生应力弛豫度的变化上, 可以看出器件的 Al 组分越大, 辐射感生应力弛豫所造成的退化也越明显. 因此, 对于较高 Al 组份的器件, 辐射感生应力弛豫的作用也更敏感.

仿真结果表明, 辐射感生应力弛豫是匹配  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  HEMTs 电学特性重要的退化机理. 在分析器件的辐射损伤效应时必须加以考虑. 通过增加 Al 组分提高 HEMT 器件二维电子浓度以达到较高性能优值时, 应当兼顾到 Al 组份对辐射感生应力弛豫的敏感性.

- [1] Eastman L F, Tilak V, Smart J, Bruce M G, Eduardo M C, Dimitrov R, Kim H, Ambacher O S, Weimann N, Prunty T, Murphy M, Schaff W J, Shealy J R 2001 *IEEE Trans. ED.* **48** 479
- [2] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, Parikh P, Keller B P, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. ED.* **48** 586

- [3] Sheppard S T, Doverspike K D, Pribble W L 1999 *IEEE Electr. Device Lett.* **20** 161
- [4] Kong Y C, Zheng Y D, Chu R M, Gu S L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1765 (in Chinese) [孔月婵, 郑有, 储荣明, 顾书明 2003 物理学报 **52** 1765]

- [ 5 ] Cai S J , Tang Y S , Li R , Wei Y Y , Wong L , Chen Y L , Wang K L , Chen M , Zhao Y F , Schrimpf R D , Keay J C , Galloway K F 2000 *IEEE Trans . ED .* **47** 304
- [ 6 ] Rashmi , Haldar S , Gupta R S 2001 *Microwave Opt . Technol . Lett .* **29** 117
- [ 7 ] Ruden P P , Albrecht J D , Sutandi A , Binari S C , Ikossi-Anastasiou K , Ancona M G , Henry R L , Koleske D D , Wickenden A E 1999 *J . Nitride Semicond . Res .* **4S1** C6.35
- [ 8 ] Ruden P P 1990 *IEEE Trans . Electron Devices* **37** 2267
- [ 9 ] Yu E T , Dang X Z , Asbeck P M 1999 *J . Vac . Sci . Technol . B* **17** 1742
- [ 10 ] Sacconi F , Carlo A D , Lugli P , Morkoc H 2001 *IEEE Trans . ED .* **48** 450

## The effect of radiation induced strain relaxation on electric performance of $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT<sup>\*</sup>

Fan Long<sup>1)†</sup> Hao Yue<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> Xtrionics Corporation , Beijing 100076 ,China )

<sup>2</sup> Key Laboratory of Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices , Microelectronic Institute , Xidian University , Xi 'an 710071 ,China )

( Received 3 April 2006 ; revised manuscript received 16 November 2006 )

### Abstract

A complete model for studying the effect of radiation induced strain relaxation on electric performance of  $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  HEMT was built utilizing the degree of strain relaxation related to radiation dose and energy as a basic variable. The effects of radiation induced strain relaxation on carrier density , threshold voltage and  $I-V$  characteristic were systematically investigated. The calculation results indicated that decrease in polarization induced charges as a result of strain relaxation causes decrease in carrier density , increase in threshold voltage and degradation in saturation drain current according to a linear rule. All results showed that the effect of radiation induced strain relaxation on HEMTs with high Al content appears more prominent. The calculation results also imply that strain relaxation is one of the important radiation damage mechanisms , the sensitivity of Al content to radiation induced strain relaxation degree need to be considered when improving the figure of merit of HEMTs by virtue of enhancement in Al content.

**Keywords :**  $\text{Al}_m\text{Ga}_{1-m}\text{N}/\text{GaN}$  , HEMT , radiation damage , strain relaxation

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

\* Project supported by the National Basic Research Program of China ( Grant No. 2002CB3119 ).

† E-mail : meilfan@yahoo.com.cn