

AlGaN/GaN 异质结辐射感生界面态电荷对二维电子气输运的影响*

范 隆^{1,2} 张进城¹ 李培咸¹ 郝 跃¹

(1 西安电子科技大学微电子所, 西安 710071)
(2 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 根据荷电中心与自由载流子间的库仑散射作用, 给出了异质结辐射感生界面态电荷对二维电子气(2DEG)迁移率的散射模型。计算了在不同沟道电子面密度下, 界面态电荷密度与其所限制的迁移率之间的关系。运用马德森定则分析了辐射感生界面态电荷散射对总迁移率的影响。分析表明, 辐射感生界面态电荷在累积到一定量后, 会显著影响迁移率, 一定程度上提高 2DEG 密度能抑制界面态电荷散射的作用。

关键词: AlGaN/GaN 异质结; 辐射; 界面态电荷; 二维电子气; 迁移率

PACC: 6180; 7360L; 7220F **EEACC:** 2530C; 2530N

中图分类号: TN304.02; TN304.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)09-0937-05

1 引言

自八十年代实现高电子迁移率晶体管(HEMT)结构以来^[1], 随着对 III-V 族化合物半导体材料研究工作的深入, HEMT 器件的性能获得了很大的提高。特别是应用了三族氮基化合物半导体, 如 GaN、AlGaN、InGaN 等以后, HEMT 的性能水平进一步得到提高, 结构优势也得到更充分的体现, 有望成为应用于微波、大功率、高温等条件下性能水平极好的器件^[2,3]。对其研究目前也成为国际上新型半导体材料、器件等微电子领域的重点研究方向。由于 HEMT 器件的性能特点决定了其应用领域和条件将十分广泛和复杂。其中涉及到空间环境的应用将会使 AlGaN/GaN HEMT 器件同样面临以往 Si、GaAs 器件所遇到的高能粒子辐射的考验, 因此对它的辐射损伤研究必不可少, 这也是所有新型器件需要满足在辐射环境中可靠性的一项基本性能要求。

对于 AlGaN/GaN HEMT 辐射损伤分析表明, 辐射感生的异质结界面态是主要的损伤机制之一,

它会对异质结二维电子气(2DEG)输运产生退化影响^[4]。目前, 在 AlGaN/GaN 中 2DEG 输运的理论研究中^[5~7], 主要考虑了异质结的本征散射机构(包括声学波形变势散射、声学波压电势散射、极化光学声子散射、合金无序散射)以及由工艺和人为因素引入的外部散射机构(主要有远程电离施主散射、本底电离杂质散射、界面粗糙度散射等)的作用, 这些研究大都忽略了异质结界面态电荷的影响, 在异质结界面态较小的情况下理论结果与实验结果符合较好, 但在人为引入大量界面态后, 其影响将变得不容忽视。文献[8~10]的实验与理论模拟计算都曾报道, AlGaAs/GaAs 异质结界面态电荷对 2DEG 的迁移率有明显影响。但到目前为止, 还没有对辐射引入 AlGaN/GaN 界面态的影响进行过实验测量或定量计算。为此, 本文根据库仑散射原理, 推导并计算了辐射感生界面态电荷散射所限制的迁移率。运用马德森定则(Matthiessen's rule)分析了界面态电荷影响总迁移率的规律, 探讨了辐照感生界面态的影响范围。

* 国防重大预研资助项目(批准号: 41308060106)

范 隆 男, 1967 年出生, 副研究员, 博士研究生, 主要从事氮化镓基材料及其高温微波大功率器件研究。

郝 跃 男, 1958 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事 IC 可靠性、可制造性以及半导体新器件与电路研究。

2002-11-06 收到, 2003-01-09

2 异质结辐射感生界面态电荷对迁移率的影响模型

已有的 AlGaN/GaN HEMT 二维载流子迁移率的理论计算^[5~7]中主要考虑的是声学和光学声子散射、电离杂质散射、合金无序散射、界面粗糙散射。其中 AlGaN 中远程施主电离杂质和 GaN 沟道剩余电离杂质的散射作用都属于杂质电荷中心对自由载流子的库仑散射作用, 是主要的外部散射机构, 其它的属于材料系统内部的散射机构。通常室温二维电子气迁移率主要由材料本征(内部)散射机构中的极化光学声子散射所主导, 为提高迁移率, 外部散射机构的作用都尽量通过器件工艺和设计减少其影响, 因而, 在室温下都比极化光学声子的作用小。而辐射感生的界面态却会由于器件应用于辐射环境而逐渐积累, 因此, 当积累到一定程度时, 由这部分附加界面态电荷散射所限制的迁移率会接近室温下主要由极化光学声子散射所决定的总迁移率, 从而造成迁移率的显著退化。

异质结界面态电荷的散射作用可运用计算库仑散射同样的方法进行分析, 本文根据 Hirakawa 和 Sakaki 给出的计算库仑散射的标准方法^[11], 推导出了辐射感生界面态电荷这种外部散射机构所决定的载流子迁移率 μ_{int} :

$$\frac{1}{\mu_{\text{int}}} = \frac{m^*}{e} \int_0^\pi v(\theta) d\theta \quad (1)$$

式中 m^* 为 GaN 中电子有效质量; e 为电子电量。若辐射前的初始迁移率为 μ_0 , 考虑辐射感生界面态电荷后的总迁移率为 μ_{irr} , 按照马德森定则 (Matthiessen's rule), 电子迁移率 μ_{irr} 与未辐照时迁移率 μ_0 和辐射感生界面态电荷散射对迁移率的贡献 μ_{int} 之间有如下关系:

$$\frac{1}{\mu_{\text{irr}}} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_{\text{int}}} \quad (2)$$

从而, 能够确定出辐射感生界面态电荷对迁移率的影响程度。我们定义能使迁移率减少 $p\%$ 的辐射感生界面态电荷面密度 N_{int} 为临界界面态电荷密度 N_{i-c} ; 与此相应的临界迁移率称为 μ_{i-c} , 则有:

$$\mu_{i-c} = \mu_0 \left| \frac{100-p}{p} \right| \quad (3)$$

(1) 式中:

$$v(\theta) = \frac{\pi \hbar (1 - \cos \theta)}{2 m^*} \left| \frac{q_s}{q} \right|^2 [S(q) F(q)]^2 N_{\text{int}} \quad (4)$$

式中 N_{int} 为辐射感生界面态电荷面密度; $S(q)$ 为屏蔽因子。

$$S(q) = \frac{q}{q + q_s H(q)} \quad (5)$$

其中

$$H(q) = \frac{b(16b^3 + 29b^2q + 20bq^2 + 5q^3)}{16(b + q)^4} \quad (6)$$

$q_s = 2m^* e^2 / \epsilon_s \hbar^2$, q 为电子动量 \mathbf{k} 与 $\mathbf{k} + \mathbf{q}$ 之间的变化, 散射角 θ 是 \mathbf{k} 与 $\mathbf{k} + \mathbf{q}$ 夹角, $q = 2k_F \sin \theta / 2$, b 是在给定 2DEG 密度 N_s 和沟道背景杂质浓度 N_{dep} 条件下, 使能量最小的值, 或者说是与 2DEG 密度有关的沟道 2DEG 宽度的量度。研究表明 b 大致随 $N_s^{0.315}$ 变化^[5]。按照文献[12], 其大小为:

$$b^3 = \frac{m^* e^2}{\hbar^2 \epsilon_s} (93N_s + 128N_{\text{dep}}) \quad (7)$$

式中 ϵ_s 为 GaN 的介电常数。(4) 式中 $F(q)$ 为:

$$F(q) = \int |x(z')|^2 \exp(-qz') dz' \quad (8)$$

其中 $x(z)$ 为迭代法自治解耦合的薛定谔方程和泊松方程, 得到沟道 2DEG 第一子带波函数的解析表达式^[5]:

$$x(z) = \frac{b^2}{\sqrt{6}} z^{3/2} \exp(-bz/2) \quad (9)$$

3 计算结果和讨论

图 1 给出了 $N_{\text{dep}} = 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, $m^* = 0.21m_0$ 时, 辐射感生界面态电荷密度(N_{int})与其散射所限定的迁移率(μ_{int})之间的关系。图中实线, 从上到下对应的 2DEG 面密度分别为 $N_s = 1 \times 10^{13}, 1 \times 10^{12}, 1 \times 10^{11}, 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。图中虚线是按(3)式计算出的与临界迁移率相应的初始迁移率(μ_0)。由图可见, μ_{int} 与 N_{int} 成简单反比关系, 即 $\mu_{\text{int}} \propto N_{\text{int}}^{-1}$ 。根据文献[13]中报道的 AlGaN/GaN HEMTs 最高室温迁移率约为 $2019 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 从图中可找到, 对于最小 2DEG 密度而言, 相应的临界界面态电荷密度 N_{i-c} 约在 $2.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时就可使上述室温初始迁移率减少 10%, 而在较高 2DEG 面密度下, 相应的 N_{i-c} 则上升到 $8.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 左右。可见, 高的 2DEG 密度能够有效提高器件的抗辐射水平。

同时, 还看到由于 $\mu_{\text{int}} \propto N_{\text{int}}^{-1}$, 对于工艺改进而提高质量的异质结构, 其初始迁移率 μ_0 越高, 则相应的临界界面态电荷密度 N_{i-c} 也越小。出现初始迁

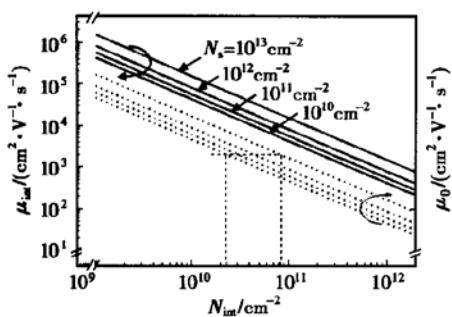


图1 辐射感生界面态电荷 \$N_{int}\$ 与其散射所限制的迁移率 \$\mu_{int}\$ 的关系(实线), 和按(3)式计算出的与临界迁移率 \$\mu_{i-c}\$ (对应于 \$p = 10\%\$) 相对应的初始迁移率 \$\mu_0\$ (虚线)

Fig. 1 Dependences of the mobility component \$\mu_{int}\$ from irradiation induced heterointerface state charges scattering on its charge density \$N_{int}\$ (solid lines), and initial mobility \$\mu_0\$ relevant to critical mobility \$\mu_{i-c}\$ calculated according to formula (3) with \$p = 10\%\$ (dashed lines)

移率较高的器件对于辐射损伤敏感, 而初始迁移率较低的器件对于辐射损伤相对不敏感。

图2给出了辐射感生界面态电荷密度固定时, \$\mu_{int}\$ 随 2DEG 面密度 \$N_s\$ 的变化关系。可以看出随 \$N_s\$ 增大, \$\mu_{int}\$ 也增加, 但是当 \$N_{int}\$ 较高时, 增加 \$N_s\$ 来提高 \$\mu_{int}\$ 的效果已不是很明显。这说明 \$N_s\$ 的调节作用是有限的, \$\mu_{int}\$ 主要由 \$N_{int}\$ 所决定。

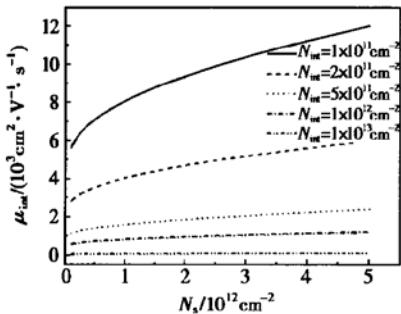


图2 2DEG 面密度 \$N_s\$ 对辐射感生界面态电荷散射所限制的迁移率 \$\mu_{int}\$ 的影响

Fig. 2 Influences of 2DEG sheet density \$N_s\$ on the mobility component \$\mu_{int}\$ from irradiation induced heterointerface state charges scattering

为进一步说明在高 2DEG 面密度下, 能提高 \$N_{i-c}\$ 的内在原因, 图3给出了 2DEG 在沟道二维量子阱中 \$z\$ 向分布随面密度的变化, 可以看到, 2DEG 面密度越大, 量子阱对其限制越强, 2DEG 离异质结

界面的距离也越近。2DEG 表征量子阱宽度的量度 \$b\$ 增加, 同时, 由于费米能量增加, 费米波矢 \$K_F\$ 也相应增加, 计算得到屏蔽因子 \$S(q)\$ 随 \$N_s\$ 增大, 如图4所示, 这表明 \$N_s\$ 增大对库仑势散射的屏蔽增强。因而, 提高 2DEG 面密度, 能够有效提高屏蔽效果, 降低界面态电荷的库仑散射几率。提高临界界面态电荷密度。

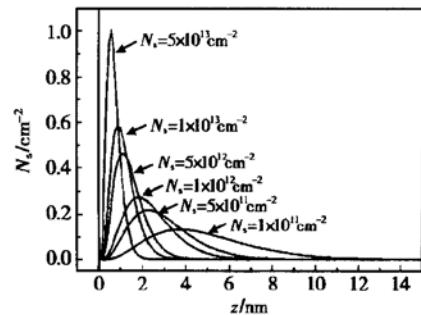


图3 2DEG 面密度 \$N_s\$ 与量子阱中电子密度的 \$z\$ 向分布的关系

Fig. 3 \$z\$-direction concentration profiles of electrons in quantum well at various 2DEG sheet density \$N_s\$

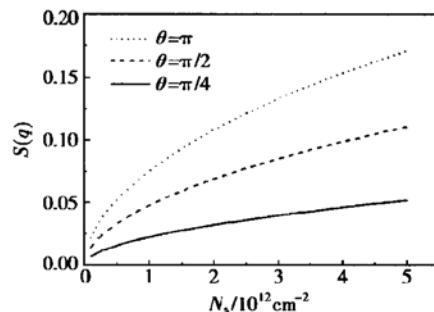


图4 屏蔽因子 \$S(q)\$ 随 \$N_s\$ 的变化

Fig. 4 Screening factor \$S(q)\$ versus 2DEG sheet density \$N_s\$

实际上, 在上述分析中, 若同时考虑初始迁移率 \$\mu_0\$ 随 2DEG 密度 \$N_s\$ 的变化, 不难发现, 从初始迁移率 \$\mu_0\$ 的角度分析, 即使从异质结构组分上控制合金散射和从工艺上减少界面不平整度, 随着 \$N_s\$ 的增加, 由于 2DEG 穿透异质结界面增多^[5,7], 仍会有合金散射和界面粗糙度散射的增大, 将导致 \$\mu_0\$ 出现下降, 与之对应的 \$N_{i-c}\$ 下降, 相应的辐射感生临界界面态电荷密度 \$N_{i-c}\$ 将有所增大。

由此可见, 虽然单纯提高 \$N_s\$, 可以提高 \$N_{i-c}\$, 但 \$N_s\$ 的增加, 会以损失 \$\mu_0\$ 为代价。因此, 对于追求异质结 2DEG 最大 \$\mu_0 N_s\$ 值的条件来讲, 当同时希

望具有较高抗辐射容限(高的 N_{i-c})时, N_s 的大小受到限制, 它存在一个最佳极大值。

在研究器件辐射损伤程度和剂量阈时, 都是针对室温特性而论, 同样, 在本文分析辐射感生界面态电荷散射对迁移率的影响时, 主要关注的是对室温下迁移率的影响。

需要指出的是, 本文采用与温度无关的库仑散射近似计算并分析了界面态电荷散射对室温迁移率的影响规律, 2DEG 受散射的计算模型中假定所有电子的散射事件发生在费米能级 E_F 上, 低温($< 100K$)下, 这一假定条件是基本成立的。而在室温($300K$)条件下, 这一近似计算会高估库仑散射的作用。但对于分析辐射感生界面态电荷的临界值(或者相应的辐射剂量容限)而言, 仍能有效地给出其量的上限, 并不影响本文的最终分析结果。

4 结论

综合上述对计算结果的分析, 得出以下结论:

(1) 辐射引入的界面态电荷在累积到一定量后, 才会显著影响迁移率。如达到本文分析中所限定的 10% 的初始迁移率退化范围, 需要辐射感生界面态电荷密度达到一定的临界值。

(2) 一定程度的提高 2DEG 密度能有效增加屏蔽作用, 减少界面态电荷的散射作用, 增加辐射感生界面态电荷的临界值, 进而提高器件的抗辐射容限。

(3) 为兼顾 AlGaN/GaN 异质结构 2DEG 高的电导和大的抗辐射容限, 2DEG 的面密度存在一个最佳的极大值。这一极大值可通过工艺或结构设计减少合金散射和界面粗糙度散射来实现。

(4) 对于外部散射机构被工艺和结构设计良好抑制的器件, 由于其初始室温迁移率(主要由材料本征散射机构所限定)较高, 反而会表现出对辐射损伤较为敏感的现象。

参考文献

[1] Mimura T, Hiyamizu S, Fujii T, et al. A new field effect transis-

tor with selectively doped GaAs/n-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions.

Jpn J Appl Phys, 1980, 19(5): L225

- [2] Eastman L F. Results, potentials and challenges of high power GaN-based transistors. Phys Status Solidi A, 1999, 176: 175
- [3] Keller S, Wu Y F, Parish G, et al. Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 552
- [4] Fan Long, Li Peixian, Zhang Jincheng, et al. Analysis on effects of irradiation induced defects on AlGaN/GaN HEMTs. Chinese Journal of Semiconductors, to be published[范隆, 李培咸, 张进城, 等. AlGaN/GaN HEMTs 器件辐射感生缺陷的影响分析. 半导体学报, 待发表]
- [5] Hsu L, Walukiewicz W. Electron mobility in Al_xGa_{1-x}N/GaN heterostructures. Phys Rev B, 1997, 56(3): 1520
- [6] Walukiewicz W, Hsu L, Haller E E. Two-dimensional electronic transport in AlGaN/GaN heterostructures. Materials Science Forum, 1998, 264~268: 1449
- [7] Link A, Ambacher O, Smorchkova I P, et al. Formation and electronic transport of 2D electron and hole gates in AlGaN/GaN heterostructures. Materials Science Forum, 2001, 353~356: 787
- [8] Lee K, Shur M S. Low field mobility of 2D electron gas in modulation doped Al_xGa_{1-x}As/GaAs layers. J Appl Phys, 1983, 54(11): 6432
- [9] Sibari H, Raymond A, Kubisa M. Charge transfer and electron mobility in GaAlAs/GaAs modulation-doped heterostructures: the role of interface states. Semicond Sci Technol, 1996, 11: 1002
- [10] Zhang Xinhong, Cheng Zhiqun, Xia Guanqun, et al. Influence of interface states on characteristics of AlGaAs/GaAs HEMT direct current output. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(11): 989[张兴宏, 程知群, 夏冠群, 等. 界面态对 AlGaAs/GaAs HEMT 直流输出特性的影响. 半导体学报, 1999, 20(11): 989]
- [11] Hirakawa K, Sakaki H. Mobility of the two-dimensional electron gas at selectively doped n-type Al_xGa_{1-x}As/GaAs heterojunctions with controlled electron concentrations. Phys Rev, 1986, B33: 8291
- [12] Yao Wei, Cao Juncheng, Lei Xiaolin, et al. Electron transport in 2DEG in AlGaN/GaN heterostructures. Journal of Functional Materials and Devices, 1999, 5(3): 213[姚微, 曹俊诚, 雷啸霖, 等. AlGaN/GaN 异质结 2DEG 载流子输运. 功能材料与器件学报, 1999, 5(3): 213]
- [13] Gaska R, Yang J W, Osinsky A, et al. Electron transport in Al-GaN-GaN heterostructures grown on 6H-SiC substrates. Appl Phys Lett, 1998, 72(6): 707

Effect of Irradiation Induced Heterointerface State Charges on 2DEG Transport Property in AlGaN/GaN Heterostructures^{*}

Fan Long^{1,2}, Zhang Jincheng¹, Li Peixian¹ and Hao Yue¹

(1 Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Based on the Coulomb scattering principle between charged centers and free carriers, a mobility model limited by scattering of irradiation induced heterointerface state charges in AlGaN/GaN heterostructure is presented. The dependences of the mobility component from heterointerface state charges scattering on its charge density are calculated with various two-dimensional electron gas densities (N_s). The influence of irradiation induced heterointerface state charges scattering on total initial mobility is analyzed by means of Matthiessen's rule. The calculated results show that irradiation induced heterointerface state charges, after reaching a critical value, can evidently degrade total mobility, and a certain extent increasing 2DEG sheet density (N_s) can restrain the scattering effect of heterointerface state charge.

Key words: AlGaN/GaN heterostructure; irradiation; heterointerface state charge; 2DEG; mobility

PACC: 6180; 7360L; 7220F **EEACC:** 2530C; 2530N

Article ID: 0253-4177(2003)09-0937-05

* Project supported by National Defence Key Pre-Research Program (No. 41308060106)

Fan Long male, was born in 1967, PhD candidate. His current research interests are in GaN-based materials and its high temperature microwave & power devices.

Hao Yue male, was born in 1958, professor, advisor of PhD candidates. His research interests include IC reliability, manufacturability, and new semiconductor devices and circuits.