

# 纤锌矿 GaN 低场电子迁移率解析模型\*

张进城 马晓华 郝 跃 范 隆 李培咸

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

**摘要:** 在 GaAs 低场电子迁移率解析模型的基础上得到了纤锌矿 GaN 低场电子迁移率的解析模型, 该模型考虑了杂质浓度、温度和杂质补偿率对低场电子迁移率的影响. 模拟结果和测量数据的比较表明该模型在  $10^{16} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  的电子浓度 30~ 800K 的温度和 0~ 0.9 的杂质补偿率范围内具有较好的一致性. 该电子迁移率解析模型对于 GaN 器件的数值模拟和器件仿真设计具有很强的实用意义.

**关键词:** GaN; 电子迁移率; 解析模型

**PACC:** 7220F; 7280E; 7360L

**中图分类号:** TN304.2<sup>+</sup>3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2003)10-1044-05

## 1 引言

随着宽禁带半导体 GaN 材料生长技术和器件制造技术的不断成熟, GaN 发光器件如蓝光发光二极管和蓝光激光器等已经进入市场, 而且 GaN 电子器件特别是以 AlGaIn/GaN HEMT 为主的微波功率器件已经获得了很高的器件性能. 最新得到的 AlGaIn/GaN HEMT 器件在 10GHz 频率下获得了高于相同类型 GaAs 器件 10 倍的功率密度<sup>[1~4]</sup>.

在 GaN 电子器件研究中, 器件的结构设计与仿真是一项非常重要的内容. 长期以来, 由于工艺不稳定导致 GaN 材料性能波动很大, 以致于无法提供器件仿真所需的稳定的物理模型与各种材料参数. 目前, 由于材料生长技术的不断提高, 材料特性已经比较稳定, 可以得到稳定的 GaN 材料参数和各种物理模型如迁移率模型和载流子产生复合模型等, 这为 GaN 器件的理论和机理研究提供很好的实验基础.

虽然目前有关 GaN 迁移率模型的文献已经很多, 但大多数都是基于实验测量和基于各种不同散射机制的物理模型研究的, 这些迁移率模型由于太过复杂或者不是解析模型, 所以无法直接用在 GaN 器件的数值模拟或器件仿真软件(如 MEDICI, ISE

等)中<sup>[5,6]</sup>.

本文基于得到的 GaN 迁移率实验测量数据, 通过对 GaAs 低场电子迁移率解析模型的分析研究, 得到了一个可以直接用于常见器件仿真软件的 GaN 低场电子迁移率的解析模型. 该迁移率模型和模型参数具有实用性和普遍性.

## 2 低场电子迁移率分析

对 III V 族化合物半导体, 如 GaAs, 主要的散射机构是晶格散射和电离杂质散射, 其中晶格散射以极化光学声子散射为主, 也有声学声子散射. 晶格散射只是绝对温度的函数, 而电离杂质散射是杂质浓度和绝对温度的函数, 因此 GaAs 低场迁移率(体内)可以表示为绝对温度和杂质浓度的函数. 常用的 GaAs 低场迁移率解析模型如下<sup>[6]</sup>.

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} \left[ \frac{T}{300} \right]^a - \mu_{\min}}{1 + \left[ \frac{T}{300} \right]^b \left[ \frac{N_{\text{total}}}{N_r} \right]^a} \quad (1)$$

其中  $\mu_{\min}$  表示最小电子迁移率;  $\mu_{\max}$  表示最大电子迁移率;  $N_r$  表示迁移率随杂质浓度增加而下降所对应的参考杂质浓度;  $a$ 、 $a$  和  $b$  均为迁移率解析模型

\* 国防预先研究资助项目(编号:41308060106)

张进城 男, 1976 年出生, 博士研究生, 主要从事宽禁带半导体技术和 MOS 器件可靠性研究.

2002-10-25 收到, 2003-01-23 定稿

中的指数因子.

虽然 GaN 的禁带宽度远大于 GaAs, 而且有很多不同于 GaAs 的特性, 但是作为 III V 族化合物半导体, GaN 的主要散射机构和 GaAs 一样, 主要是极化光学声子散射和电离杂质散射, 如图 1 所示<sup>[7]</sup>. 在低温下 (大约 200K 以下) 电离杂质散射占主要地位, 即使在杂质浓度低至  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时电子迁移率仍然主要由电离杂质散射决定, 而在高温下 (大约 200K 以上) 主要散射机构是极化光学声子散射.

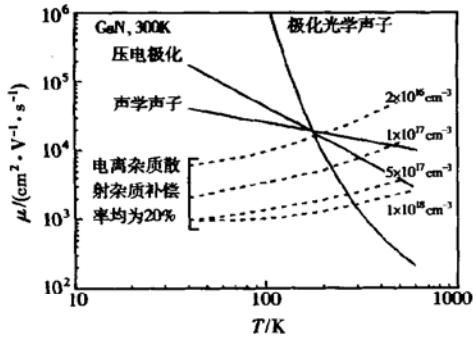


图 1 由极化光学声子、压电极化电场、声学声子和电离杂质散射决定的电子迁移率

Fig. 1 Electron mobility limited by polar optical phonon, piezoelectric, acoustic, and ionized impurity scattering

由于 GaN 和 GaAs 均为 III V 族化合物半导体, 两者在散射机构上规律相同, 因此可以预料 GaAs 低场电子迁移率解析模型也可以适用于 GaN 的低场电子迁移率描述, 只是模型参数需要重新确定. 当然以往的 GaAs 电子迁移率模型没有考虑杂质补偿率的影响, 主要是由于容易得到背景杂质浓度很低的 GaAs 本征材料, 而目前所能获得的 GaN 晶体材料却具有很高的背景杂质浓度, 因此 GaN 电子迁移率模型需要考虑杂质补偿率的影响.

### 3 GaN 低场迁移率解析模型

以上分析表明, 可以基于公式 (1) 的 GaAs 低场电子迁移率解析模型来建立 GaN 的低场电子迁移率解析模型. 具体 GaN 模型结果如下.

#### 3.1 杂质浓度与低场电子迁移率的关系

室温下  $T = 300\text{K}$  时, (1) 式可以简化为:

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N_e}{N_{re}}\right)^\alpha} \quad (2)$$

式中  $N_e$  和  $N_{re}$  分别代替了 (1) 式中的  $N_{\text{total}}$  和  $N_i$ , 主要因为在实验中直接测量得到的是 GaN 电子浓度, 而不是杂质浓度. 这里的  $N_e$  和  $N_{re}$  分别表示电子浓度和模型中对应的参考电子浓度. 电子浓度  $N_e$  为施主杂质浓度  $N_d$  减去受主杂质浓度  $N_a$ , 即  $N_e = N_d - N_a$ .

利用 (2) 式通过对图 2 迁移率随杂质浓度变化的测量值进行最小二乘曲线拟合进行参数提取. 同时, 必须兼顾不同杂质补偿率情况下的迁移率随杂质浓度的变化曲线. 我们通过对 7 种杂质补偿率下杂质浓度与迁移率关系的综合研究, 得到 (2) 式的 GaN 一组模型参数如下:

$$\begin{aligned} \mu_{\min} &= 186 - 198\theta (\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})); \\ \mu_{\max} &= 1208 (\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})); \\ N_{re} &= 10^{17.5 - 1.69\theta} (\text{cm}^{-3}); \\ \alpha &= 0.49 + 0.13\theta. \end{aligned}$$

其中  $\theta$  表示杂质补偿率,  $\theta = N_a / N_d$ .

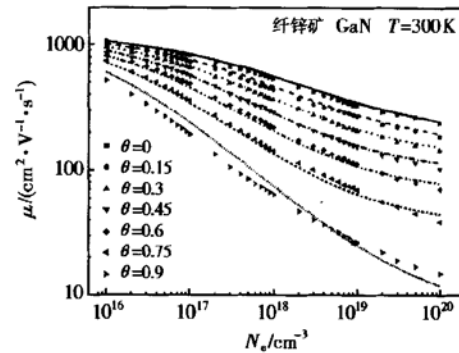


图 2 GaN 电子迁移率随电子浓度的变化关系 符号线表示测量值, 无符号线表示模拟值.

Fig. 2 Electron mobility of GaN versus electron concentration for different impurity compensations The signals are the measured results, and the lines are the simulated.

图 2 给出了电子迁移率随电子浓度变化的关系曲线, 其中符号线为测量数据, 源于文献[8], 实线为利用上述模型参数和公式 (2) 计算得到的数值. 从图中可以看出, 除了在杂质补偿率很高时稍微有所偏离, GaN 模型计算值和测量值吻合得很好. 对于 MOCVD 和 MBE 方法外延生长的 GaN 晶体, 通常的背景掺杂均为 n 型, 因此 n 型 GaN 的杂质补偿率为零. 而对于采用 HVPE 方法生长得到的 GaN 晶体背景掺杂可能为 p 型<sup>[8]</sup>, 因此杂质补偿率对 HVPE 生长的 GaN 体电子迁移率的影响需要考虑. 当然随着工艺的进步杂质补偿率也不会太高, 因此 (2) 式可以

反映电子浓度和杂质补偿率对电子迁移率的影响。

### 3.2 温度与低场电子迁移率的关系

在考虑了杂质浓度对低场电子迁移率影响的基础上,再加入温度对电子迁移率的影响.采用(1)式作为杂质浓度和温度对迁移率影响的基本模型,如公式(3),只是用  $N_e$  和  $N_{re}$  分别代替了(1)式中的  $N_{total}$  和  $N_r$ ,便于和实验数据比较。

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} \left[ \frac{T}{300} \right]^a - \mu_{\min}}{1 + \left[ \frac{T}{300} \right]^b \left[ \frac{N_e}{N_{re}} \right]^a} \quad (3)$$

将上述已得到的四个模型参数  $\mu_{\min}$ 、 $\mu_{\max}$ 、 $N_{re}$  和  $a$  的数值代入(3)式,对图3不同电子浓度下的迁移率随温度的变化曲线(符号线即测量数据<sup>[8]</sup>)进行最小二乘曲线拟合,得到 GaN 两个温度模型参数为  $a = -3.5$ ,  $b = -3.6$ 。

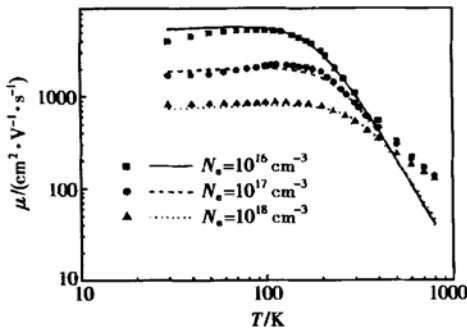


图3 GaN 电子迁移率随温度的变化关系 符号线表示测量值,无符号线表示模拟值。

Fig. 3 Electron mobility of GaN versus temperature for different electron concentrations The signals are the measured results, and the lines are the simulated.

图3的无符号线为利用得到的模型参数计算出的关系曲线.从中可以看出,(3)式适用于300K 温度以下的低温范围(见图4),当然到400K 也可以适用,而从300K 温度开始,随着温度升高,(3)式的计算值与实验测量值的偏差不断增大,到400K 以上时该模型已不适用。

为了解决上述解析模型在高温下(300K 以上)不适用的问题,本文采用了分段模型,即在300K 以下的温度范围内,采用(3)式的迁移率模型,而对于

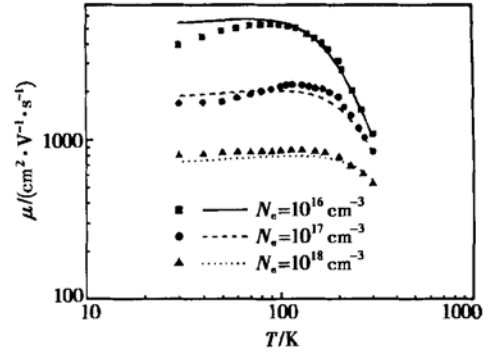


图4 300K 以下 GaN 电子迁移率随温度的变化曲线  
Fig. 4 Electron mobility of GaN versus temperature under 300K The signals are the measured results, and the lines are the simulated.

300K 以上的温度范围,可以采用(3)式模型的简化形式,即(4)式。

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} \left[ \frac{T}{300} \right]^a - \mu_{\min}}{1 + \left[ \frac{N_e}{N_{re}} \right]^a} \quad (4)$$

利用(4)式对300K 以上的迁移率随温度的变化曲线(图5符号线)进行最小二乘曲线拟合,得到模型参数  $a = -2.45$ .将已确定的模型参数代入(4)式后得到的曲线见图5的无符号线.可以看出,在300 ~ 800K 温度范围内该简化模型即(4)式可以适用。

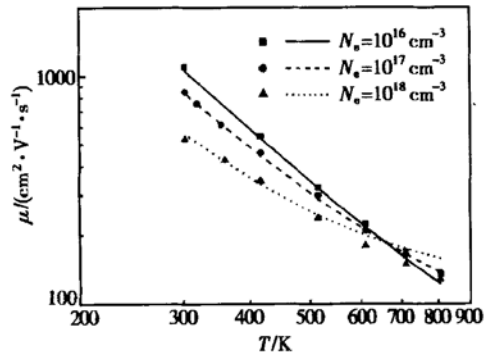


图5 300K 以上 GaN 电子迁移率随温度的变化曲线  
Fig. 5 Electron mobility of GaN versus temperature above 300K The signals are the measured results, and the lines are the simulated.

### 3.3 GaN 低场电子迁移率解析模型

通常在考虑杂质浓度对迁移率的影响时,并不使用总电子浓度  $N_e$ ,而是采用总的局部杂质浓度  $N_{total}$ .由于直接影响迁移率的是电离杂质,即总的局部杂质浓度是直接影响局部电子迁移率的本质因

素, 而电子浓度会受到内部电场和外偏电场的影响, 在很多情况下局部的电子浓度并不是和局部的杂质浓度成正比. 因此在迁移率模型中采用局部杂质浓度更为合理. 由于本文的测量数据来源于均匀掺杂的样品, 因此局部的电子浓度和杂质浓度是成正比的.

下面采用简单的数值变换将上述模型中的电子浓度  $N_e$  过渡为杂质浓度  $N_{total}$ .

由于

$$N_e = N_d - N_a = N_d - \theta N_d = (1 - \theta)N_d$$

而

$$N_{total} = N_d + N_a = N_d + \theta N_d = (1 + \theta)N_d$$

因此

$$N_{total} = \frac{1 + \theta}{1 - \theta} N_e$$

$$\frac{N_e}{N_{re}} = \frac{N_{total}}{\frac{1 + \theta}{1 - \theta} N_{re}} = \frac{N_{total}}{N_r} \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式, 就可以得到最终的 GaN 低场电子迁移率模型:

$$\mu = \mu_{min} + \frac{\mu_{max} \left[ \frac{T}{300} \right]^a - \mu_{min}}{1 + \left[ \frac{T}{300} \right]^b \left[ \frac{N_{total}}{N_r} \right]^a} \quad (6)$$

可以看出, 最终的 GaN 低场电子迁移率解析模型(6)式和 GaAs 模型(1)式具有相同的形式, 只是其中的模型参数有所不同. 为了便于用以前的 GaAs 器件仿真器对 GaN 器件进行模拟, 本文把杂质补偿率对电子迁移率的影响归入了模型参数中. 各模型参数的确定方式和数值如表 1 所示.

表 1 GaN 低场电子迁移率解析模型的模型参数

Table 1 Model parameters of analytic low field electron mobility model of GaN

模型参数	$T > 300K$	$T < 300K$
$\mu_{min}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	186-1980	186-1980
$\mu_{max}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1208	1208
$N_r/\text{cm}^{-3}$	$\frac{1 + \theta}{1 - \theta} \times 10^{17.5 - 1.69\theta}$	$\frac{1 + \theta}{1 - \theta} \times 10^{17.5 - 1.69\theta}$
$a$	0.49+ 0.130	0.49+ 0.130
$b$	- 2.45	- 3.5
$c$	0	- 3.6

虽然在低温下 GaN 中的 p 型杂质和 n 型杂质均存在不完全电离, 但是上述用  $N_e$  替代  $N_{total}$  的方式仍然有效. 这是因为测量得到的总电子浓度  $N_e$  本

质上是电离施主浓度  $N_d$  减去电离受主浓度  $N_a$ , 所以本文中使用的  $N_d$  和  $N_a$  本质上就是代表电离的施主浓度和受主浓度, 因此本文提出的低场电子迁移率解析模型在低温和高温下都具有普遍适用性.

## 4 结论

载流子的迁移率模型对材料和器件特性的分析和研究是非常重要的, 目前没有 GaN 材料的迁移率解析模型. 本文研究了纤锌矿 GaAs 低场电子迁移率解析模型, 基于该模型研究并得到了纤锌矿 GaN 低场电子迁移率解析模型. 新模型考虑了杂质浓度、温度和杂质补偿率对低场电子迁移率的影响(GaAs 迁移率模型中没有考虑这些问题). GaN 模型的模拟结果和测量数据的比较表明: 该模型在  $10^{16} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$  的电子浓度 30~ 800K 的温度和 0~ 0.9 的杂质补偿率范围内具有较好的一致性. 由于目前 GaN 材料的生长技术还不是很稳定, 而且用于 GaN 材料生长的方法很多, 因此不同的 GaN 材料样品可能具有不同的个性. 然而本文提出的模型是基于决定 GaN 半导体材料迁移率的基本物理散射机构如极化光学声子散射和电离杂质散射等的基础建立起来的, 因此该电子迁移率解析模型可以适用于不同工艺和不同类型的 GaN 材料.

## 参考文献

- [ 1 ] Keller S, Wu Yifeng, 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
- [ 2 ] Sullivan G J, Chen M Y, Higgins J A, et al. High power 10-GHz operation of AlGaIn HFET's on insulating SiC. IEEE Electron Device Lett, 1998, 19(6): 198
- [ 3 ] Lu Wu, Yang Jinwei, Khan M A, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on SiC with over 100GHz  $f_T$  and low microwave noise. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 581
- [ 4 ] Wu Y F, Keller B P, Keller S X, et al. GaN-based FETs for microwave power amplification. IEICE Trans Electron, 1999: 1895
- [ 5 ] Farahmand M, Garetto C, Bellotti E, et al. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-Nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 535
- [ 6 ] Avant! Corporation. Two-Dimensional Device Simulation Program Medici Version 4.1 User's Manual, 1998: 95
- [ 7 ] Morkoc H. Nitride semiconductors and devices. New York: Springer-

Verlag, 1999: 240

[ 8 ] Chin V W L, Tansley T L, Ostockton T. Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides. *J Appl Phys*, 1994, 75: 7365

## An Analytic Low Field Electron Mobility Model of Wurtzite GaN\*

Zhang Jincheng, Ma Xiaohua, Hao Yue, Fan Long and Li Peixian

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

**Abstract:** Based on the analytic low field electron mobility model of GaAs, a new analytic low field electron mobility model of wurtzite GaN is presented. The new model accounts for the dependencies of dopant concentration, temperature, and impurity compensation ratio on low field electron mobility. A comparison between simulation and measurement results shows that the new analytic model has a good agreement in the electron concentration range of  $10^{16} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  and the temperature range of 30~ 800K. The analytic electron mobility model has a strong applicability for numerical simulation of GaN devices.

**Key words:** gallium nitride; electron mobility; analytic model

**PACC:** 7220F; 7280E; 7360L

**Article ID:** 0253-4177(2003)10-1044-05

---

\* Project supported by Defense Advanced Research Program (No. 41308060106)

Zhang Jincheng male, was born in 1976. PhD candidate. His research interest is in wide bandgap semiconductor technology, MOS devices, and its reliability.

Received 25 October 2002, revised manuscript received 23 January 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics