

不同散射机理对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 反型沟道电子迁移率的影响*

黄苑 徐静平[†] 汪礼胜 朱述炎

(华中科技大学, 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2013年3月18日收到; 2013年4月9日收到修改稿)

通过考虑体散射、界面电荷的库仑散射以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙散射等主要散射机理, 建立了以 Al_2O_3 为栅介质 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n 沟金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (nMOSFETs) 反型沟道电子迁移率模型, 模拟结果与实验数据有好的符合. 利用该模型分析表明, 在低至中等有效电场下, 电子迁移率主要受界面电荷库仑散射的影响; 而在强场下, 电子迁移率则取决于界面粗糙度散射. 降低界面态密度, 减小 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙度, 适当提高 In 含量并控制沟道掺杂在合适值是提高 InGaAs nMOSFETs 反型沟道电子迁移率的主要途径.

关键词: InGaAs, MOSFET, 反型沟道电子迁移率, 散射机理

PACS: 72.20.Fr, 73.40.Qv, 02.60.Ed

DOI: 10.7498/aps.62.157201

1 引言

随着互补金属-氧化物-半导体 (CMOS) 工艺特征尺寸持续减小, Si 基 MOS 器件已逐渐达到其物理极限, 选用新的沟道材料, 如应力 Si 材料、Ge 或 Si-Ge 合金材料、InGaAs 材料等来增加沟道载流子迁移率成为人们研究的热点^[1-7]. 近年来, InGaAs nMOSFETs 由于其高的反型沟道电子迁移率而受到广泛关注. 2007 年, 文献 [8] 制造了单栅高 κ 栅介质的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFETs, 测得其沟道电子迁移率峰值为 $2200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 与应变 Si 的 $500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[9] 以及 Ge 的 $1100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ^[10] 相比显然具有更大优势. 2010 年, 文献 [11] 采用蒙特卡罗计算方法计算了 III-V 族化合物半导体高 κ 栅介质 MOS 器件的反型层电子迁移率, 结果比较精确, 但计算量较大, 耗时较长. 2011 年, 文献 [12] 采用半经验公式对不同 In 组分含量的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 的反型层电子迁移率进行了计算, 但未进行实验验证, 只能定性地讨论影响因素而不能对电子迁移率进行精确模拟. 基于这些情况, 本文通过考虑

体散射、界面态的库仑散射以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙散射三种主要散射机理, 建立了与实验数据相符的 Al_2O_3 栅介质 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFETs 反型沟道电子迁移率模型, 并全面模拟分析了界面态密度、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙度、温度、In 组分含量以及沟道掺杂浓度等因素对器件反型沟道电子迁移率的影响.

2 迁移率模型

InGaAs nMOSFETs 的结构示意图如图 1 所示. 与多晶硅栅 Si 基 nMOSFETs 类似, InGaAs nMOSFETs 反型沟道电子受到的主要散射机理包括体声子散射, 电离杂质散射, 界面态电荷的库仑散射以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ 界面粗糙散射, 根据 Mathiessens 规则

$$\frac{1}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{1}{\mu_{\text{b}}} + \frac{1}{\mu_{\text{it}}} + \frac{1}{\mu_{\text{sr}}}, \quad (1)$$

式中, μ_{eff} 为反型沟道电子总有效迁移率, μ_{b} 为考虑体声子散射和电离杂质散射的体迁移率; μ_{it} 为界

* 国家自然科学基金 (批准号: 61176100) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jpxu@mail.hust.edu.cn

面态电荷库仑散射迁移率; μ_{sr} 为表面粗糙度散射迁移率.

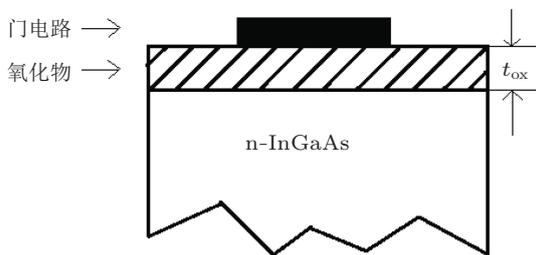


图1 InGaAs MOS 结构图

2.1 体迁移率 μ_b

不同的沟道材料具有不同的体迁移率, InGaAs 材料正是由于其明显高于 Si 材料的电子迁移率而在高频、快速 MOS 器件中得到广泛应用. 由于 In 含量的不同, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的迁移率也不同. 根据文献 [12], In 含量分别为 0.53, 0.65, 0.75 时, InGaAs 的 μ_b 分别为 $6.5 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $8.3 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.1 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 即随着 In 含量的增加, 材料的体迁移率增加. 但因为晶格匹配问题, 目前广泛使用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 作为沟道材料.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 体迁移率不仅受到 In 含量的影响, 温度和沟道掺杂浓度也会对其产生影响. 一般可表示为 [13]

$$\mu_b(N, T) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max}(300 \text{ K})(300 \text{ K}/T)^{\theta_1} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N_d}{N_{\text{ref}}(300 \text{ K})(T/300 \text{ K})^{\theta_2}} \right)^\eta}, \quad (2)$$

式中, $\mu_{\max}(T)$ 为低掺杂浓度下由晶格散射限制的体迁移率, 随温度的升高而减小; μ_{\min} 为较高掺杂浓度下的体迁移率, 大小和温度无关; $N_{\text{ref}}(T) = N_{\text{ref}}(300 \text{ K})(T/300 \text{ K})^{\theta_2}$, 为迁移率减小至最大值一半时的掺杂浓度; N_d 为沟道掺杂浓度; $\theta_1 (> 0)$, θ_2 , η 为拟合参数.

一般来说, 选择体迁移率高的材料作为 MOSFET 的沟道材料是有利的, 但高的体迁移率也并不一定意味着反型沟道电子迁移率就高, 因为 nMOSFET 的反型沟道电子迁移率不仅仅取决于体迁移率, 还和其它许多因素有关.

2.2 界面态电荷库仑散射迁移率 μ_{it}

根据文献 [14], $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFETs 界面态

电荷的库仑散射迁移率可以写为

$$\mu_{it} = \frac{\mu_0}{N_{it}\alpha}, \quad (3)$$

式中, μ_0 为不考虑自由电子屏蔽效应时每单位面积每库仑散射中心的迁移率, 其值为 $3.75 \times 10^{11} T \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (T 为绝对温度); 系数 α 表示反型电子在界面处出现的概率, 一般取 0.01; N_{it} 为界面陷阱电荷面密度

$$N_{it} = \int_{E_i}^{E_F} D_{it}(E_T) dE_T, \quad (4)$$

其中, $D_{it}(E_T)$ 是界面态密度, E_F 和 E_i 分别为费米能级和本征费米能级. 在 InGaAs nMOSFET 的工作区, 反型电子密度通常较高, 库仑散射中心的库仑势因而受到载流子的屏蔽而显著降低. 这种屏蔽效应使得界面态电荷的库仑散射迁移率随着反型电子浓度的升高而增加. 考虑屏蔽效应时, 引进退化参数 F , 将 (3) 式修正为 [14]

$$\mu_{it} = \frac{\mu_0}{N_{it}\alpha} F \left(1 + \frac{L_{th}}{L_s} \right)^2, \quad (5)$$

式中, L_s 为屏蔽长度, L_{th} 为电子散射热长度,

$$L_{th} = h / (2\pi\sqrt{2m^*kT}), \quad L_s = \sqrt{L_{TF}^2 + L_{DH}^2},$$

$$L_{TF} = \frac{h^2}{4\pi} \epsilon_s / (q^2 m^*), \quad L_{DH} = \frac{2\epsilon_s kT}{q^2 N_{inv}},$$

$$F = \frac{L_s}{L_{DH}},$$

h 为普朗克常数, N_{inv} 为反型电子密度, ϵ_s 为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的介电常数, m^* 为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 有效电子质量, q 是电子电量, k 为玻尔兹曼常数.

2.3 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙度散射迁移率 μ_{sr}

MOSFET 反型沟道载流子迁移率在强场下主要受到界面粗糙度散射的影响, μ_{sr} 与电场的关系可表示为 [15]

$$\mu_{sr} = \frac{\delta}{E_{\text{eff}}^\gamma}, \quad (6)$$

式中, E_{eff} 是有效垂直电场, γ 为拟合参数, 其拟合值为 1.57, δ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面粗糙程度、氧化物的介电常数以及费米面波矢有关 [16], 可由公式 $\delta = \frac{9\sqrt{\pi}\hbar}{4m^*} \lambda^{[12]}$ 计算, 其中 $\lambda = l/\Delta^2$, l 为相关长度, Δ 为界面粗糙度 $\Delta(x, y)$ 的均方根. 在 l 相同时, λ 越小, 表明界面越粗糙.

利用上述各散射机理所决定的迁移率模型, 通过 Matlab 软件编程, 可以得到 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOS-FET 反型沟道电子有效迁移率.

3 模拟结果与分析

因 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的物理参数与 In 含量有关, 故在下面模拟仿真中以 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 为例进行, 有关参数如表 1 所示. 模拟结果将与文献 [8] 中的实验结果以及采用蒙特卡罗模拟方法的计算结果进行比较, 以验证上述模型的正确及实用性.

图 2 为采用上述模型计算的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 反型沟道电子有效迁移率. 为分析散射机理, 图中也给出了界面电荷库仑散射迁移率和

表面粗糙散射迁移率. 可以看出, 模拟结果 (图 2 中的 μ) 和文献 [8] 的实验结果 (图 2 中的 μ_{ref}) 符合较好, 但在低场下模拟结果略大于实验值. 这主要是因为模型忽略了栅介质 Al_2O_3 中远程声子散射对沟道电子迁移率的影响. 从曲线变化趋势可知, 在较低的沟道有效电场下, 电子迁移率主要受到界面电荷库仑散射的影响, 随有效电场增加, 反型电子浓度增加, 电子屏蔽效应增加, 使得界面态的库仑散射迁移率随反型电子浓度的升高而增加; 而当沟道有效电场较高时, 电子迁移率主要受到界面粗糙度散射的影响, 即随有效电场的增加, 界面粗糙度散射增加, 使得相应的散射迁移率下降, 从而导致总的电子有效迁移率随有效电场的增加而下降.

表 1 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 模型参数设置

参数符号	$\epsilon_s^{[12]}$	$m^*[12]$	$\delta/V \cdot s^{-1}$	N_{it}/cm^{-2}
参数取值	13.9	0.041	1.42×10^{12}	3.9×10^{12}
参数符号	N_d/cm^{-2}	T/K	$\mu_{\text{max}}(300\text{K})/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[13]}$	$\mu_{\text{min}}/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1[13]}$
参数取值	1×10^{17}	300	14000	300
参数符号	$\theta_1^{[13]}$	$\theta_2^{[13]}$	$\eta^{[13]}$	
参数取值	1.59	3.68	0.48	

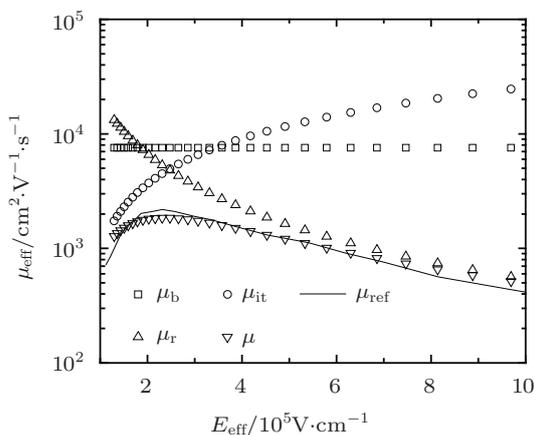


图 2 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 电子迁移率模拟结果及其与实验结果的比较

界面态电荷对沟道载流子可以起到库仑散射作用, 使迁移率降低, 从而使 MOSFET 的跨导下降, 频率特性和开关特性变差, 以及阈值电压不稳定. 因此讨论界面态密度对 nMOS-FET 电子迁移率的影响十分必要. 图 3 为界面态密度为不同值时, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 电子迁移率随有效电场的变化. 模拟中, N_{it} 分别

取 $3.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 其他参数如表 1 所示.

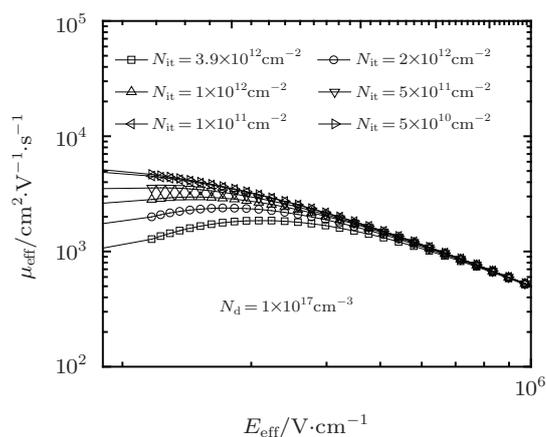


图 3 界面态密度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 沟道电子迁移率的影响

由图 3 可以看出, 随界面态密度 N_{it} 增加, 电子有效迁移率减小, 特别是在低和中场区, 而在强场区, 不同界面态密度下的电子迁移率趋于一致. 这表明在低和中场区, 电子迁移率主要决定

于界面态的库仑散射, 而强场下迁移率主要决定于界面粗糙度散射, 与前面分析结果一致. 此外, 由于 $N_{it}(Q_{it} = qN_{it})$ 增加使得器件达到反型所需的电场增加 (阈值电压增加), 从而导致迁移率峰值随 N_{it} 增加而向强场方向移动. 而且可观察到 $N_{it} = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 和 $N_{it} = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的两条曲线基本重合, 表明当 $N_{it} \leq 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 界面态电荷库仑散射对电子迁移率的影响可以忽略 [17].

图 4 是 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 界面粗糙度对沟道电子迁移率的影响. 模拟中表征界面粗糙度的系数 λ 分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 (相关长度 $l = 1 \text{ nm}$ [12]), 其他参数如表 1 所示. 从模拟结果可看出, 在有效电场较低时, 电子迁移率趋于一致, 随电场增加, 不同界面粗糙度下迁移率的差别逐渐增大. 这表明高场下界面粗糙度散射是影响迁移率的主要机理, 而低场下, 正如上面讨论的, 是界面电荷的库仑散射起主要作用. 进一步地, 在强场下, 界面粗糙度越大, 电子迁移率越小; 随 λ 增加 (粗糙度减小), 电子迁移率之间的差别减小, 表明在界面粗糙度小于某个值 (如 $\lambda = 0.6$) 之后, 界面粗糙度散射对电子迁移率的影响可以忽略.

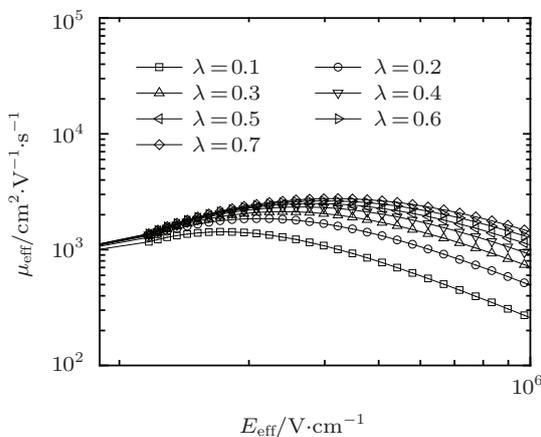


图 4 表面粗糙度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 电子迁移率的影响

由 (2) 式可以看出, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的体迁移率与温度有关, 从而影响反型沟道总的电子迁移率, 模拟结果如图 5, 图 6 所示.

从图 5 可以看出, $N_d = 0$ 时, 体迁移率随温度升高迅速减小, 这是因为晶格散射此时起主要作用. 当 N_d 不为 0 时, 随温度升高, 电子迁移率先增加后减小, 前者来自杂质散射 (随温度增加, 杂质散射减弱), 后者来自晶格散射 (随温度增加, 晶格散射增强); 随 N_d 增加, 从杂质散射过渡到晶格散射的温

度增加, 且在晶格散射区迁移率下降趋势变缓; 当温度不变时, 随 N_d 增加, 杂质散射增加, 体迁移率减小. 因此, 为了获得高的体迁移率, 掺杂浓度不宜太高.

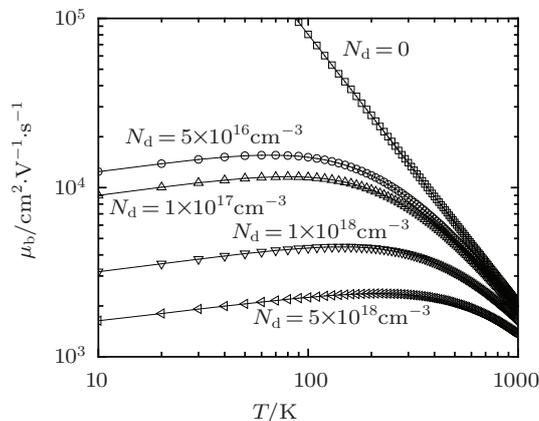


图 5 不同掺杂浓度下温度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 体迁移率的影响

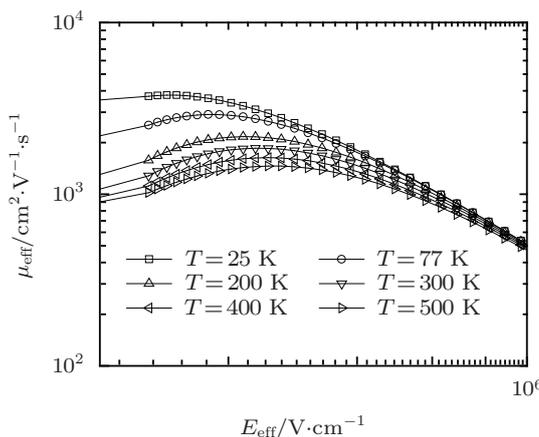


图 6 温度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 沟道电子迁移率的影响 ($N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

图 6 为温度 T 对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 沟道电子迁移率的影响. 由图 6 可看出, 温度越高, 电子迁移率越小, 且迁移率峰值右移. 这是因为随温度增加, 虽体迁移率增加 ($T < 200 \text{ K}$), 但电子散射热长度 L_{th} 减小, 屏蔽长度 L_s 增大, 使得和载流子散射动能交换有关的介电函数减小, 导致界面态的库仑散射迁移率减小, 从而总的电子有效迁移率减小; 且随温度增加, 晶格散射增强, 使得器件达到反型所需要的有效电场增加, 故迁移率峰值右移; 而在强场下, 电子迁移率主要取决于界面粗糙度散射, 故迁移率的变化趋于一致.

采用上面所建立的迁移率模型, 可方便地分析沟道掺杂浓度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET

电子迁移率的影响, 如图 7 所示. 模拟中取 $N_{it} = 3.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $\lambda = 0.2$, $T = 300 \text{ K}$, 沟道掺杂浓度 N_d 分别为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

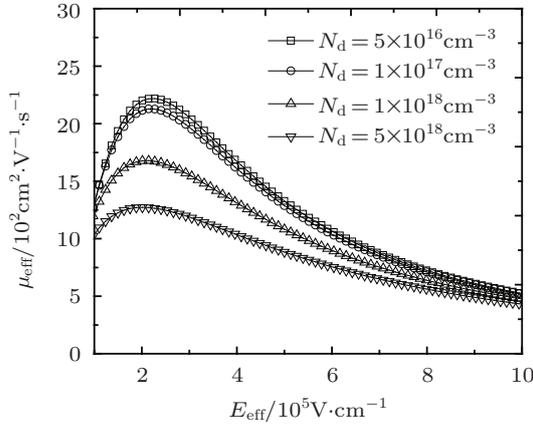


图 7 沟道掺杂浓度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ nMOSFET 电子迁移率的影响

从图 7 可以看出, 随沟道掺杂浓度 N_d 的增加, 迁移率峰值迅速减小, 这是因为 N_d 越高, 离子杂质散射越严重. 而且可观察到, $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_d = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的两条曲线基本重合, 表明当 $N_d \leq 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时, 沟道掺杂浓度对电子迁移率的影响可以忽略. 因此, 低的沟道掺杂更有利于载流子迁移率的提高, 但为了抑制短沟道效应, 需提高沟道掺杂, 故需折衷选取沟道掺杂浓度, 如取 $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 对于 $L = 0.5 \mu\text{m}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 的沟道掺杂一般为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [12], 可见模拟结果具有较好的实用性.

图 8 表示 In 含量对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 电子迁移率的影响. 模拟中取沟道掺杂浓度 $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $T = 300 \text{ K}$, $\lambda = 0.2$, x 分别为 0.53, 0.65, 0.75, $N_{it} = 1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 其他参数取值如表 2 所示.

从图 8 可以看出, 在弱场及中等场强区, 电子迁移率随 x 增加而增加, 峰值迁移率增加更为明显; 随 E_{eff} 增加, 不同 In 含量对应的电子迁移率间的差别逐渐减小, 最终趋于一致. 这是由于在低场下体迁移率随 x 的增加而增加, 从而使总电子迁移率峰值增加; 而在高场下, 表面粗糙度散射起主要作用, 使得不同 In 含量的电子迁移率随电场增加而逐渐趋于一致.

从上面讨论可知, 在低至中场区, 提高 In 含量能有效提高电子迁移率, 但 In 含量的增加会导

致 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与 InP 衬底产生晶格失配, 从而在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 外延层中产生缺陷, 降低材料质量, 导致器件性能下降. 因此, 应适当选取 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 的含量. 目前, 普遍使用的 In 含量是 53%.

表 2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x 分别为 0.53, 0.65, 0.75) 材料的物理参数

物理参数	$\epsilon_s^{[12]}$	$m^*[12]$	$\mu_b/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}[12]$	$\delta/\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	13.9	0.041	6.5×10^3	1.42×10^{12}
$\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$	14.2	0.036	8.3×10^3	4.26×10^{12}
$\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$	14.4	0.032	1.1×10^4	4.97×10^{12}

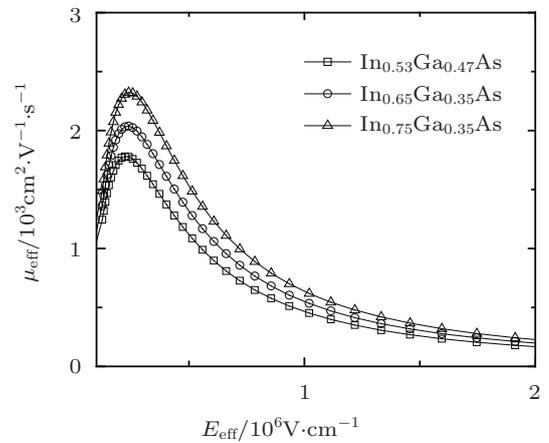


图 8 In 含量对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.53, 0.65, 0.75$) nMOSFETs 电子迁移率的影响, $N_{it} = 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

4 结论

本文对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 反型沟道电子迁移率的散射机理进行了分析研究, 建立了包括体散射、界面电荷库仑散射以及表面粗糙度散射的电子迁移率模型, 实验和数值模拟结果证实了该模型的正确和有效性. 利用该模型对影响反型沟道电子迁移率的因素进行了分析讨论, 得出: 1) 沟道有效电场较弱时, 反型沟道电子迁移率取决于界面电荷的库仑散射, 界面态密度越小, 迁移率越高; 2) 沟道有效电场较强时, 界面粗糙度散射起主要作用, 界面越平坦, 迁移率越高; 3) $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 体迁移率主要受温度和掺杂浓度的影响, 低掺杂浓度下, 随温度增加, 晶格散射增加, 迁移率下降严重, 高掺杂浓度下, 杂质散射增加, 体迁移率减小, 但在晶格散射区随温度下降趋势变缓; 4) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 含量越高, 体迁移率越大, 反型沟道电子迁移率也随之增加, 但高 In 含量会导致 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 与 InP 衬底产生晶格失配, 从而在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中产生缺

陷, 导致器件性能变差; 5) 沟道掺杂浓度越高, 电子迁移率越小, 但对抑制器件的短沟道效应有利. 因此, 降低界面态密度, 减小 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 界面

粗糙度, 适当选取 In 组分含量以及对 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料进行适量掺杂将有利于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET 反型沟道电子迁移率的提高及短沟道效应的改善.

- [1] Zhang Z F, Zhang H M, Hu H Y, Xuan R Y, Song J J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4948 (in Chinese) [张志锋, 张鹤鸣, 胡辉勇, 宣荣喜, 宋建军 2009 物理学报 **58** 4948]
- [2] Zou X 2007 *Ph.D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [邹晓 2007 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [3] Khairurrijal, Mizubayashi W, Miyazaki S, Hirose M 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3000
- [4] Larcher L, Paccagnella A, Ghidini G 2001 *IEEE Transactions on Electron Device* **48** 271
- [5] Hansen K, Brandbyge M 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3582
- [6] Zhang X F, Qiu Y Z, Zhang Z J, Chen Y, Huang J, Wang Z L, Xu J P 2010 *Research & Progress of Solid State Electronics* **30** 180 (in Chinese) [张雪峰, 邱云珍, 张振娟, 陈云, 黄静, 王志亮, 徐静平 2010 固体电子学研究进展 **30** 180]
- [7] Hill R J W, Droopad R, Moran D A J, Li X, Zhou H, Macint Y D, Thoms S, Ignatova O, Asenov A, Rajagopalan K, Fejes P, Thayne I G, Passlack M 2008 *Electronics Letters* **44** 498
- [8] Xuan Y, Wu Y Q, Lin H C, Shen T, Ye P D 2007 *IEEE Electron Device Letters* **28** 935
- [9] Rim K, Koester S, Hargrove M, Chu J, Mooney P M, Ott J, Kanarsky T, Ronsheim P, Jeong M, Grill A, Wong H S P 2001 *Tech. Dig. VLSI Symp.* **4-89114-012-7** 59
- [10] Lee C H, Nishimura T, Saido N, Nagashio K, Kita K, Toriumi A 2009 *Tech. Dig. in. Electron Devices Meet* Baltimore, MD, USA, Dec. 7-9 2009 p1(Piscataway, NJ, USA: IEEE)
- [11] O'Regan T P, Fischetti M V, Sorée B, Jin S, Magnus W, Meuris M 2010 *Journal of Applied Physics* **108** 103705
- [12] Wang W K, Hwang J C M, Xuan Y, Ye P D 2011 *IEEE Transactions on Electro Devices* **58** 1972
- [13] Sotoodeh M, Khalid A H, Rezazadeh A A 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 2890
- [14] Zou X, Xu J P, Chen W B, Wu H P 2005 *Micro Electronics* **35** 465 (in Chinese) [邹晓, 徐静平, 陈卫兵, 吴海平 2005 微电子学 **35** 465]
- [15] Li B, Liu H X, Yuan B, Li J, Lu F M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017202-1 (in Chinese) [李斌, 刘红侠, 袁博, 李劲, 卢凤铭 2011 物理学报 **60** 017202-1]
- [16] Stephen K P, Neil G, James M M, Bernstein J, Scozzie C J, Lelis A 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 4053
- [17] Zhang X F, Xu J P, Zou X, Zhang L J 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 2000 (in Chinese) [张雪峰, 徐静平, 邹晓, 张兰君 2006 半导体学报 **27** 2000]

Effects of different scattering mechanisms on inversion-channel electron mobility in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ nMOSFET*

Huang Yuan Xu Jing-Ping[†] Wang Li-Sheng Zhu Shu-Yan

(School of optical and electronic information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 18 March 2013; revised manuscript received 9 April 2013)

Abstract

An inversion-channel electron mobility model for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (nMOSFETs) with Al_2O_3 as gate dielectric is established by considering main scattering mechanisms of bulk scattering, Coulomb scattering of interface charges and interface-roughness scattering of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ interface. The simulated results are in good agreement with the experimental data. Analyses by using the model indicate that the total electron mobility is mainly limited by the Coulomb scattering of interface charges under weak and medium effective fields and by the interface-roughness scattering under strong effective fields. Therefore, the effective approaches of enhancing the inversion-channel electron mobility are to reduce the interface-state density and roughness of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ interface, to properly increase the In content and control the doping concentration of the $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ channel to a suitable value.

Keywords: InGaAs, MOSFET, inversion-channel electron mobility, scattering mechanisms

PACS: 72.20.Fr, 73.40.Qv, 02.60.Ed

DOI: 10.7498/aps.62.157201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176100).

[†] Corresponding author. E-mail: jpxu@mail.hust.edu.cn