

**Е.Ю. Днестранская<sup>1</sup>, К.В. Дудинов<sup>1</sup>, В.Г. Тихомиров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

## **Анализ чувствительности параметров слоев к технологическим разбросам изготовления гетероструктур на арсениде галлия при производстве МИС СВЧ с использованием численного моделирования.**

*В статье приведены результаты моделирования СВЧ-транзистора на основе простой структуры (MESFET) и мощного СВЧ-транзистора (DPHEMT) на основе двусторонне легированной РНEMT-гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/AlGaAs/GaAs. Проведен анализ чувствительности параметров слоев к технологическим разбросам изготовления гетероструктур. Определены технологические нормы изготовления эпитаксиальных структур при допустимом разбросе параметров транзистора 10%.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, СВЧ транзисторы, производство МИС СВЧ

На сегодняшний день является актуальным моделирование эпитаксиальной структуры с целью ее оптимизации и разработки новых структур, обеспечивающих требуемые параметры изготовленных на их базе приборов. Данные таких расчетов позволяют определить требования к производителю структуры, допустимый разброс параметров структуры, например, такие как концентрация легирования и толщина слоев.

Целью данной работы являлась разработка методов калибровки и проведение расчетов, а также анализ структур на GaAs используемых при производстве МИС СВЧ. В процессе работы осуществлялось моделирование СВЧ-транзистора на основе простой структуры (MESFET) и мощного СВЧ-транзистора (DPHEMT) на основе двусторонне легированной РНEMT-гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/AlGaAs/GaAs. При проведении расчетов использовались физические модели, необходимые при моделировании приборов на гетеропереходах типа НЕМТ[1-3], учитывались процессы рекомбинации, ударной ионизации, термоионной и полевой эмиссии. Рассчитывалась подвижность и скорость электронов в слоях эпитаксиальной структуры с учетом влияния концентрации примеси, отрицательной дифференциальной проводимости и напряженности электрического поля.

Верификация моделей осуществлялась по смоделированным вольтамперным характеристикам структуры и сверке их с экспериментальными данными. В процессе работы проводилось исследование зависимости вольтамперных характеристик транзистора MESFET и DPHEMT от концентрации легирования и от толщины легированного слоя транзисторной эпитаксиальной структуры.

В результате исследования выявлено, что при производстве структуры MESFET-транзистора недопустимо отклонение от технологических норм изготовления толщины легированного слоя более чем на 4.5%, что составило для данной структуры  $\pm 3$  нм. Так

же недопустимо отклонение от технологических норм изготовления концентрации легирования слоя более чем на 8%, чтобы обеспечить разброс вольтамперных характеристик не более чем на  $\pm 10\%$  от требуемого значения.

Для моделирования транзистора DPHEMT использовалась структура с описанием слоев указанной в работе[4]. Расчеты вольтамперных характеристик DPHEMT-транзистора производились с использованием тех же физических моделей что и при расчете MESFET транзистора, параметры моделей настраивались дополнительно для слоев AlGaAs и InGaAs. Вид экрана монитора с результатами моделирования DPHEMT-транзистора с затвором 150 мкм представлен на рис.1-3.

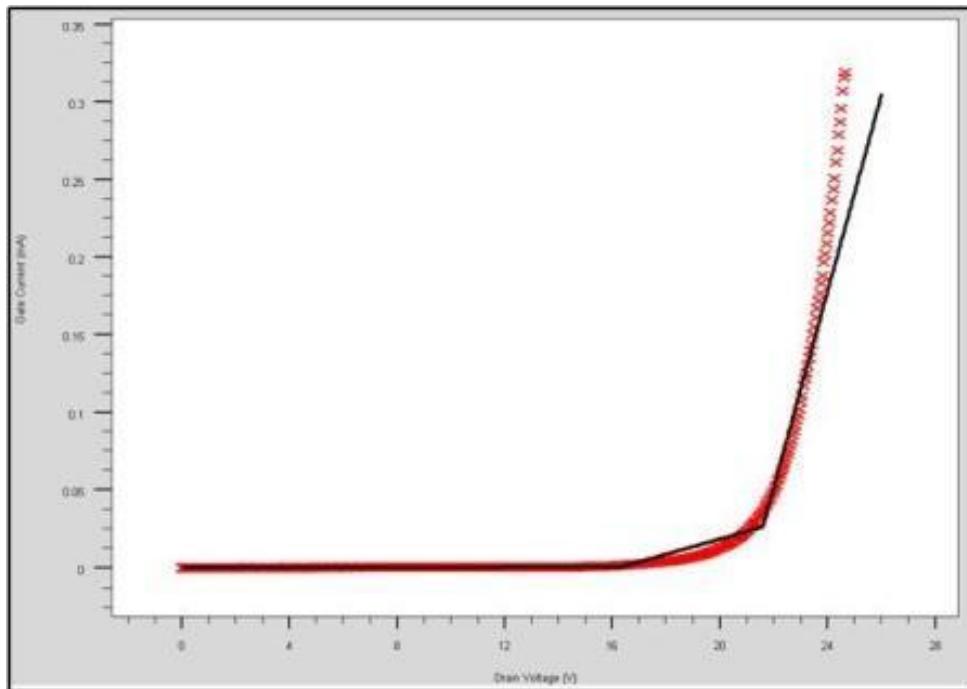


Рис. 1.

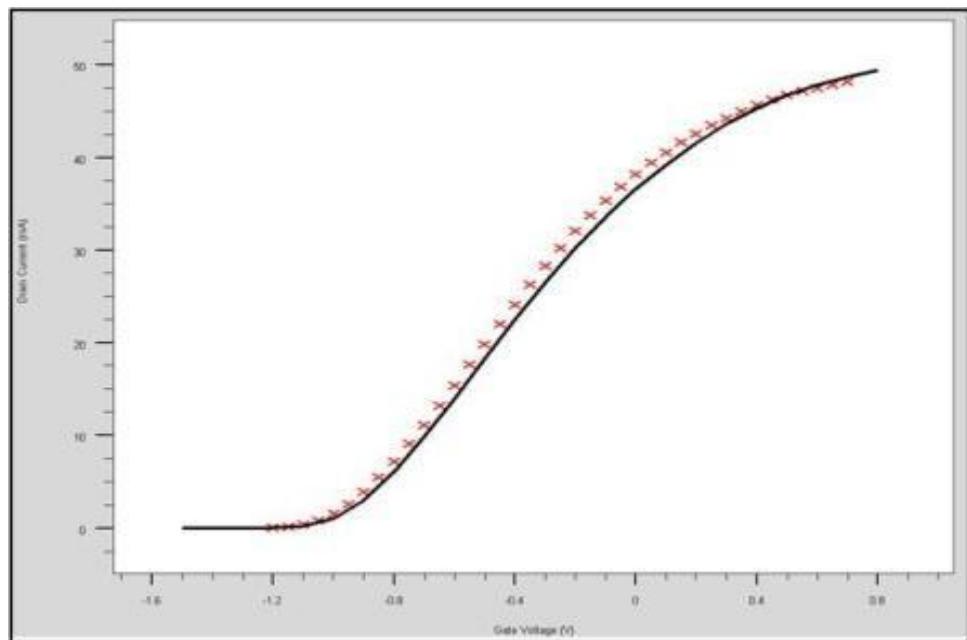


Рис. 2.

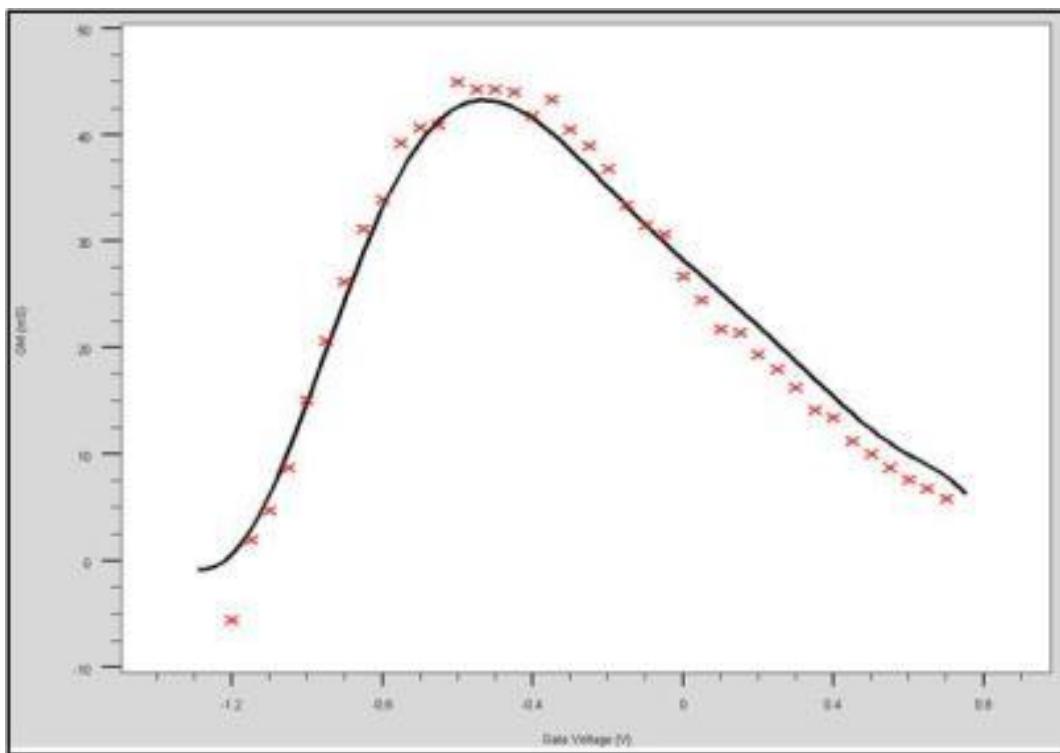


Рис. 3.

На рисунках везде можно отметить хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Расчетные кривые отображаются сплошной линией, а экспериментальные данные прерывистой. Так, на рис.1 показана зависимость тока затвора от напряжения на стоке, рис.2. дает представление о зависимости тока стока от напряжения на затворе, а на рис.3 показана внутренняя крутизна транзистора.

В таблице 1 показан отклик вольтамперных параметров DPHEMT-транзистора на 10% изменение концентрации легированных слоев транзисторной эпитаксиальной структуры.

Таблица 1

Наименование материала	$\Delta I_{max}/I_{max}$	$\Delta G_m/G_m$	$\Delta V_p/V_p$	$\Delta V_{bd}/V_{bd}$
GaAs (контактный слой)	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 1\%$
AlGaAs (стоп-слой)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
GaAs(барьерный слой)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
AlGaAs (барьерный слой)	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.3\%$
AlGaAs (сильнолегированный слой над каналом)	$\pm 9\%$	$\pm 5.5\%$	$\pm 13\%$	$\pm 10.5\%$
AlGaAs (сильнолегированный слой под каналом)	$\pm 2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$

В таблице 2 показан отклик параметров транзистора на 10% изменение толщины слоев транзисторной эпитаксиальной структуры.

Таблица 2

Наименование материала	$\Delta I_{max}/I_{max}$	$\Delta G_m/G_m$	$\Delta V_p/V_p$	$\Delta V_{bd}/V_{bd}$
GaAs (контактный слой)	$\pm 0.6\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 4.4\%$
AlGaAs (стоп-слой)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.4\%$
GaAs(барьерный слой)	$\pm 1.8\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 4.5\%$	$\pm 3\%$
AlGaAs	$\pm 3\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 4.3\%$
AlGaAs(сильнолегированный слой)	$\pm 8.5\%$	$\pm 3.2\%$	$\pm 15\%$	$\pm 9\%$
AlGaAs	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 1\%$
GaAs	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.5\%$
InGaAs(канал)	$\pm 1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 1\%$
GaAs	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
AlGaAs	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
AlGaAs(сильнолегированный слой)	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$
AlGaAs	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$

Где параметры транзистора:  $I_{max}$  – максимально возможный ток стока,  $G_m$  – крутизна,  $V_p$ - напряжение отсечки,  $V_{bd}$  – пробивное напряжение.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что изменение концентрации легирования или толщины сильнолегированного слоя, расположенного между затвором и каналом, наиболее сильно влияет на вольтамперные характеристики DPHEMT-транзистора. Следовательно, при производстве структуры недопустимо отклонение от технологических норм изготовления концентрации легирования данного слоя более чем на 7% и отклонение от технологических норм изготовления толщины данного слоя более чем на 6%, что составит для данного слоя менее 1 нм ( $8.4\text{\AA}$ ), чтобы обеспечить разброс вольтамперных характеристик не более чем на  $\pm 10\%$  от требуемого значения.

В результате проведенной работы, авторами статьи была разработана методика калибровки параметров расчетных моделей к применяемому технологическому оборудованию и технологическим процессам, как для эпитаксиального выращивания слоев на GaAs, так для производства МИС СВЧ в ФГУП «НПП «Исток».

#### Библиографический список

1. "Atlas Users Manual", SILVACO International, (2009)
2. И.С.Васильевский, Г.Б.Галиев, Е.А.Климов, В.Г.Мокеров, С.С.Широков, Р.М.Имамов, И.А.Субботин, "Электрофизические и структурные свойства двусторонне d-легированных РНEMT-гетероструктур на основе AlGaAs/InGaAs/AlGaAs", Физика и техника полупроводников, том 42, вып.9, (2008)
3. S.Adachi, "Physical properties of III-V semiconductor compounds InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs and InGaAsP", John Wiley&Sons, (1992)
4. А.Ю. Егоров, А.Г. Гладышев, Е.В. Никитина, Д.В. Денисов, Н.К. Поляков, Е.В. Пирогов, А.А. Горбацевич, "Двухканальные псевдоморфные НЕМТ-гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs с импульсным легированием", Физика и техника полупроводников, 2010, том 44, вып. 7, стр. 950-954