

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.794.61

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
GaAs ТРАНЗИСТОРОВ С СУБМИКРОННОЙ ДЛИНОЙ ЗАТВОРА**

В.Н. МИЩЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 30 июня 2016*

Рассмотрены вопросы моделирования основных выходных характеристик GaAs транзисторов диапазона КВЧ, которые находят широкое применение для создания приемопередающих устройств, усилителей и ряда других приборов. Для моделирования использовалась разработанная программа, в которой реализован многочастичный метод Монте-Карло совместно с решением уравнения Пуассона для трехмерной области приборной структуры. Особенностью моделируемых GaAs транзисторов явился учет особого профиля легирования подзатворной области структуры, который может быть сформирован с помощью ионной имплантации и позволяет улучшить выходные характеристики. Исследование трехмерной структуры из материала GaAs позволило учесть все геометрические размеры структуры и особенности формирования затвора и других контактных областей. В процессе моделирования анализировалось влияние прикладываемого постоянного смещения, особенностей формирования контактных областей структуры и ряд других параметров на выходные характеристики транзисторов.

Ключевые слова: транзистор, диапазоны СВЧ и КВЧ, арсенид галлия, метод Монте-Карло.

Введение

Исследование процессов формирования полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$, и особенно материала GaAs, продолжает оставаться актуальной задачей, которая связана с разработкой эффективных и совершенных приборов диапазонов СВЧ и КВЧ. Наиболее корректным методом для анализа физических процессов в таких структурах считается применение статистического метода Монте-Карло, который позволяет учесть все механизмы рассеяния носителей заряда в полупроводнике и получить характеристики транзисторов для стационарных и динамических процессов. При использовании метода Монте-Карло носители заряда в полупроводниках подвергаются воздействию внешнего электрического поля и рассеиваются в случайные моменты времени в соответствии с известными вероятностями рассеивания. Моделирование поведения электронов с применением случайных чисел для розыгрыша процессов рассеяния и времен свободного пробега составляют главную особенность моделирования полупроводниковых структур с использованием метода Монте-Карло [1, 2].

При исследовании полупроводниковых структур важное значение приобретает моделирование статических характеристик – зависимостей токов стока и затвора от приложенных напряжения на контактах прибора, которые определяют выходные характеристики – коэффициенты усиления и шума, проводимость, выходное сопротивление и т.д. Важное значение при этом имеют особенности формирования, размеры и ряд других параметров контактных областей затвора, стока и истока приборной структуры. Для улучшения выходных характеристик транзисторов диапазонов СВЧ и КВЧ используется формирование специального профиля легирования подзатворной области структуры с

повышенным значением концентрации электронов, которое обеспечивается обычно с помощью ионной имплантации [3, 4]. Другой особенностью затворов транзисторов из GaAs и ряда других материалов является формирование в их составе барьера Шоттки, что приводит к необходимости ввода при моделировании так называемого «встроенного потенциала», величина которого приблизительно оценивается величиной $-0,8$ В. Наличие такой структуры затвора, как предполагается, приводит к тому механизму, когда затвор поглощает убывающие из приборной структуры носители заряда и препятствует инжекции новых носителей извне структуры. Однако данное предположение недостаточно подробно рассмотрено в публикациях и отсутствуют результаты теоретических исследований. Остальные контактные области – исток и сток – обычно рассматриваются как омические, для которых возможно как поглощение, так и инжекция носителей заряда. Основной целью выполненных исследований, использующих метод Монте-Карло, было изучение влияния контактных областей на основные выходные характеристики GaAs транзисторов диапазона КВЧ.

Метод и особенности моделирования

Известно, что результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло зависят от значений основных электрофизических параметров материала и параметров модели зоны проводимости. В настоящее время для материала GaAs общепризнанной является трехдолинная модель, в которой одной нижней долине Γ (или G) сопутствуют верхние долины L (общее количество – 4 долины) и X (общее количество – 3 долины). В разработанной программе моделирования процессов переноса носителей заряда с использованием метода Монте Карло для материала GaAs были учтены наиболее важные механизмы рассеяния: на полярных оптических фононах, на примесях, на акустических фононах, междолинное рассеяние между эквивалентными и неэквивалентными долинами [1, 2]. При моделировании были использованы параметры для материала GaAs, данные о которых приведены в [5, 6]. Был реализован многочастичный метод Монте-Карло, который использовался совместно с решением уравнения Пуассона для трехмерной области приборной структуры с учетом «встроенного потенциала» барьера Шоттки для области затвора.

Полученные результаты моделирования и их обсуждение

Моделируемая полупроводниковая структура, сформированная из материала GaAs, представлена на рис. 1. Используя процедуру метода Монте-Карло, были исследованы особенности формирования выходных характеристик в трехмерной GaAs структуре при температуре $T = 300$ К.

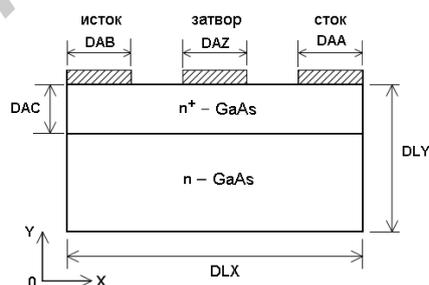


Рис. 1. Моделируемая полупроводниковая структура из материала GaAs

Количество моделируемых частиц принималось равным 41550, количество элементарных ячеек (шагов) вдоль оси X принималось равным 150, вдоль оси Y – 30, вдоль оси Z – 1. Концентрация электронов в n -GaAs области структуры принималась равной $1 \cdot 10^{16}$ см^{-3} . В n^+ -GaAs области рассматривалась особая форма легирования, описанная в [4], при которой максимальная концентрация в области, примыкающей к внешней границе структуры, составляет приблизительно $1 \cdot 10^{18}$ см^{-3} и плавно уменьшается к границе с n -GaAs областью. При этом предполагалось, что концентрация высоколегированных контактных областей (не показанных на рис. 1) равняется величине $1 \cdot 10^{18}$ см^{-3} . Длина затвора (параметр DAZ) составляла величину 0,25 мкм, размеры истока и стока принимались равными, соответственно,

$DAB = 0,3 \text{ мкм}$ и $DAA = 0,3 \text{ мкм}$. Величины параметров DAC, DLX, DLY, показанных на рис. 1, равнялись, соответственно, $0,15 \text{ мкм}$, 3 мкм и $0,3 \text{ мкм}$, соответственно. Длина структуры вдоль оси OZ, т.е. в поперечном направлении, принималась равной 40 мкм .

Полученные зависимости тока стока I_d от напряжения стока U_d при различных напряжениях затвора U_z представлены на рис. 2.

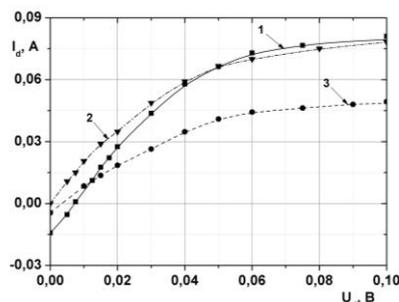


Рис. 2. Зависимость тока стока от напряжения на стоке

Кривые 1 и 2 получены при значении напряжения на затворе U_z равном $0,77 \text{ В}$, для кривой 3 – при значении напряжения на затворе U_z равном $0,2 \text{ В}$. При моделировании зависимостей, показанных кривыми 1–3, не допускалось инжектирование электронов через затвор внутрь структуры. Кривые 1 и 3 соответствуют обычному варианту омических контактов для истока и стока, при котором допускалось поглощение и испускание электронов, а также в соответствии с рекомендациями в [7, 8] поддерживалась постоянная концентрация электронов в слоях, непосредственно примыкающих к стоку и истоку. Кривая 2 на рис. 2 получена с учетом новой методики, суть которой сводится к введению дополнительной процедуры распределения инжектируемых электронов между истоком и стоком. Распределение электронов между истоком и стоком производилось с использованием специально вводимого коэффициента распределения электронов, который определялся отдельным предварительным моделированием. При такой методике моделирования на первом этапе постоянное напряжение стока U_d приравнялось нулю и путем итераций обеспечивалось в конечном итоге близкое к нулю значение выходного тока стока I_d , что обычно фиксируется в экспериментальных измерениях. На втором этапе, при последующих расчетах, найденное на первом этапе численное значение коэффициента перераспределения электронов между стоком и истоком использовалось и при других параметрах и условиях моделирования. Анализ этих данных показывает, что при выполнении описанной выше процедуры удается обеспечить лучшее соответствие экспериментальным условиям для тока стока (кривая 2, рис. 2), чем для обычного распределения электронов между стоком и истоком (кривая 1, рис. 2).

Полученные зависимости тока стока I_d от напряжения на затворе U_z представлены на рис. 3 при напряжении на стоке $U_d = 1,5 \text{ В}$. На этом рисунке кривые 1, 3 получены путем моделирования и соответствуют различным способам формирования и распределения убывающих и инжектируемых носителей заряда, а кривая 2 – экспериментальная зависимость, полученная в [3]. При моделировании структуры, у которой допускалось инжектирование электронов с затвора, получена зависимость, представленная на рис. 3 кривой 1. Видно, что использование условия инжектирования электронов с затвора (кривая 1 на рис. 3) плохо соответствует экспериментальным данным (кривая 2, рис.3). В то время как предложенная методика моделирования контактных областей (кривая 3, рис. 3) обеспечивает более точное соответствие экспериментальным данным (кривая 2, рис. 3). Это позволяет считать обоснованной предложенную выше методику представления и описания контактных областей при моделировании GaAs транзисторов диапазонов СВЧ и КВЧ и использовать ее для моделирования выходных характеристик таких приборов. Применение специального профиля легирования подзатворной области структуры с повышенным значением концентрации электронов обеспечило реализацию высоких значений важнейшей выходной характеристики транзистора – параметра крутизны характеристики $g_m = \Delta I_d / \Delta U_z$. Для моделируемой структуры были получены значения параметра g_m в диапазоне от 610 мС/мм до 240 мС/мм при изменении напряжения затвора в диапазоне от $0,6 \text{ В}$ до $-0,8 \text{ В}$. Это приблизительно соответствует значениям этого параметра, полученным в [3] на основе экспериментальных измерений, где

максимальная величина этого параметра составила 520 мС/мм при напряжении на затворе $U_z = 0,8$ В. Для структуры, описанной в [8] с длиной затвора 0,25 мкм, но с размерами приборной структуры вдоль осей X и Y равными 1,25 мкм и 0,1 мкм, соответственно, и концентрацией $7 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, получено значение крутизны характеристики $g_m = 600$ мС/мм при температуре 77 К.

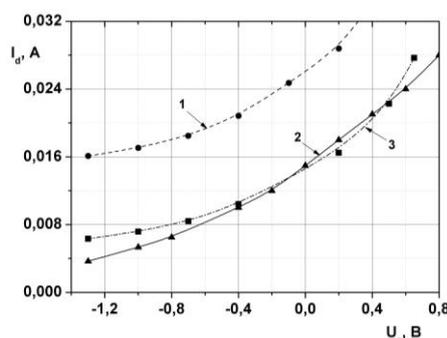


Рис. 3. Зависимость тока стока от напряжения на затворе

Заключение

Рассмотрены вопросы моделирования основных выходных характеристик GaAs транзисторов диапазонов СВЧ и КВЧ, которые находят широкое применение для создания приемопередающих устройств, усилителей и ряда других приборов. Для моделирования использовалась разработанная программа, в которой применялся многочастичный метод Монте-Карло совместно с решением уравнения Пуассона для трехмерной области приборной структуры. Особенностью моделируемых GaAs транзисторов явился учет особого профиля легирования подзатворной области структуры, который может быть сформирован с помощью ионной имплантации и позволяет улучшить выходные характеристики. Предложена новая методика учета контактных областей GaAs транзисторов, которая позволила повысить точность моделирования выходных характеристик исследованных приборов диапазона КВЧ.

THREE DIMENSION MODELLING OF OUTPUT CHARACTERISTICS OF GALLIUM ARSENIDE TRANSISTORS WITH SUBMICRON LENGTH OF THE GATE

V.N. MISHCHENKA

Abstract

Modeling results of output static characteristics of gallium arsenide transistors for extreme high frequency range are given. Direct ion-implanted gallium arsenide transistors with the special profile under the gate are analyzed. Many particle Monte Carlo method with the solving of the Poisson equation are used for simulation of the three dimension structure with submicron length of the gate. Investigation of the gallium arsenide device provided the new results which connected with the influence of the geometrical size of the structure and features of gate construction to the output static characteristics. New modeling method of contact regions in device is presented for gallium arsenide transistors.

Keywords: transistor, ultra high frequency and extreme high frequency ranges, gallium arsenide, Monte Carlo method.

Список литературы

1. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М., 1987.
2. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. М., 1991.
3. Feng M., Laskar J. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1993. V. ED-40. № 1. P. 9–17.
4. Williams C.K., Glisson T.H., Hauser J. R. et. al // Solid-State Electronics. 1989. Vol. 28, № 11. P. 1105–1109.
5. Fawcett W., Boardman D.A., Swain S. // Journal of Physical Chemistry Solids. 1970. Vol. 31. P. 1963–1990.
6. Мищенко В.Н. // Докл. БГУИР. 2015. № 8 (94). С. 99–102.
7. Hockney R. W., Warriner R. A., Reiser M. // Electronic Letters. 1974. Vol. 10. № 23. P. 484–486.
8. Awano Y., Tomizawa K., Hashizume N. // IEEE Transactions on Electron Devices. 1984. Vol. ED-33. № 4. P. 448–452.