

высокочастотная влагометрия // Измерения, контроль, автоматизация, 1989. 4(72). С. 22-31. **6. Гордиенко Ю.Е., Борщев В.Н., Гуд Ю.И., Серяков А.Н., Черенков А.И.** Безэлектродный входной и межоперационный контроль фотопроводящих материалов // Сб. «Технология», сер. «Технология приборостроения». ЦНТИ «Поиск», 1992. Вып.2. С.32-39. **7. Гордиенко Ю.Е.** Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника, 1996. Вып. 100. С.253-260. **8. Неразрушающие бесконтактные СВЧ резонаторные методы локального контроля электрофизических параметров полупроводниковых материалов / Ахманаев В.Б., Детинко М.В., Медведев Ю.В. и др. // Дефектоскопия, 1986. №1. С.23-35. **9. Браун В.Б.** Диэлектрики. М.: Ин. Литер, 1961. 326 с. **10. Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1957. **11. Гордиенко Ю.Е.** Определение характеристик объемных резонаторов со слоистым заполнением // Радиотехника, 1982. Вып. 60. С.17-23. **12. Гордиенко Ю.Е., Гуд Ю.И.** Взаимодействие электромагнитного поля СВЧ резонаторов с полупроводником через отверстие в стенке // Радиотехника, 1983. № 67. С.85-90. **13. Гордиенко Ю.Е., Овчаренко Л.А.** Характеристики объемных СВЧ резонаторов, апертурно нагруженных слоистой полупроводниковой средой // Радиотехника, 1988. Вып. 85. **14. S. Trabelsi, A.W.Krazzewski, S.O.Nelson.** New density – independent calibration function for microwave sensing**

of moisture content in particulate materials //IEEE Trans. Instrum. Meas. 1998. V. 47, № 3. P. 622. **15. Y. Zhang, S. Okumura.** New density independent moisture measurement using microwave phase shifts of two frequencies // IEEE. Trans. Instrum. Meas. 1999. V. 48, № 6. P.1208-1211.

Поступила в редколлегию 18.11.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Фисун А.И.

Гордиенко Юрий Емельянович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.

Герасимов Владимир Петрович, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: компьютерное моделирование в электронике. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 70-21-362.

Хаммуд Фади Мохамед, аспирант кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств ХНУРЭ. Научные интересы: микроэлектроника, неразрушающий контроль материалов и изделий. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр.Ленина, 14, тел.: (0572) 70-21-362.

УДК 621.382.323

МОДЕЛЬ ПТШ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ НА КРЕМНИИ.

ЧАСТЬ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

ЗУЕВ С.А., СТАРОСТЕНКО В.В., ТЕРЕЩЕНКО В.Ю., ЧУРЮМОВ Г.И., ШАДРИН А.А.

Описываются результаты расчета входных и выходных статических характеристик полупроводниковых приборов на основе Si.

Физические и геометрические характеристики модели

Расчеты проводились для ПТШ n-типа на Si, работающих на частотах свыше 50 ГГц, с эффективными длинами затвора – 60, 200 и 300 нм; уровни легирования слоев Si: $n^- = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ в буферном слое, $n = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в канале, $n^+ = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ в контактном слое. Материал металлизации затвора – Au с подслоем из W. Геометрия моделируемого транзистора представлена на рис.1. Все расчеты проводились для транзистора, включенного по схеме с общим истоком и нагруженного активным сопротивлением.

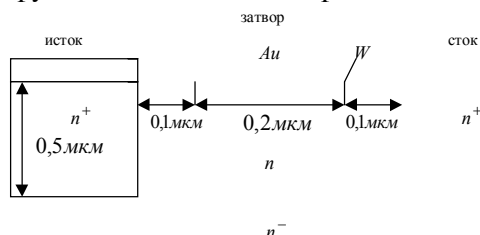


Рис.1. Геометрия моделируемого ПТШ транзистора
РИ, 2004, № 4

Методика проведения численного эксперимента

Используя программу численного моделирования полевого транзистора, необходимо для получения статических характеристик вычислять и анализировать статические и динамические процессы в приборе на каждом временном шаге [1].

Статические и динамические характеристики моделируемого прибора вычисляются по токам на электродах при приложенном к ним фиксированном напряжении. Полный ток на электроде состоит из конвекционного тока (тока частиц) и тока смещения, которые получаются соответственно из первого и второго членов в выражении:

$$Q(t) = q \cdot (N_a - N_i) + \epsilon \epsilon_0 \int E_y(x, t) dx,$$

где интеграл берется по поверхности электрода и q – заряд, приходящийся на 1 м макрочастицы ($q = -enL_xL_y / \epsilon N$, где n – плотность легирования; L_x, L_y – размеры области легирования; ϵ – относительная диэлектрическая постоянная; N – число моделируемых частиц); N_a – полное число частиц, поглощенных к моменту времени t ; N_i – полное число частиц, инжектированных к моменту времени t ; $E_y(x, t)$ – электрическое поле в рабочей области прибора в момент времени t в точке x .

В процессе этой фазы расчета, когда рассматривается полный поток заряда, частицы рассматриваются как двумерные заряженные стержни или макрочастицы.

Начальным условием численного эксперимента будет состояние с нейтрализованным зарядом. Частицы распределены однородно в легированной эпитаксиальной области для нейтрализации примесного заряда. Их координаты получаются с помощью генератора случайных чисел с однород-

ным распределением. Условие нейтрализации заряда выбирается для того, чтобы избежать очень сильных полей и нестационарностей, которые могут появиться, когда разделение зарядов не может происходить естественным путем из динамики процессов в приборе.

Если к электродам приложено типичное рабочее напряжение, то заряды входят и выходят из электродов, пока не установится условие стационарного течения тока. Этот процесс иллюстрируется на рис. 2, который показывает эквивалентный заряд $Q(t)$, протекающий через каждый электрод к моменту времени t .

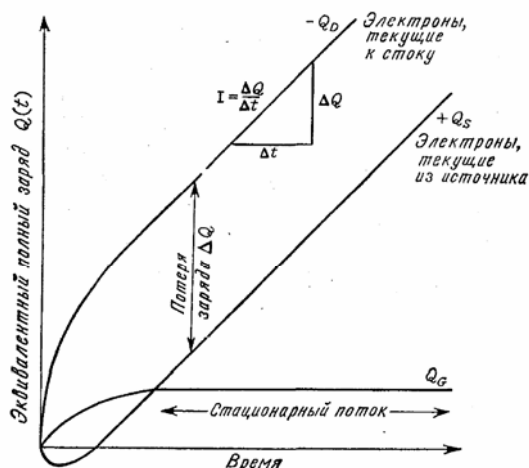


Рис.2. Эквивалентный полный заряд как функция времени для электродов истока, стока и затвора после скачка, заданного в вольтах на стоке

Кривые на рис. 2 показывают суммарное число электронов, поглощенных стоком и инжектированных истоком. Первоначально электроны отражаются отрицательным потенциалом на затворе, и в то время, когда в области под затвором число носителей убывает, электроны покидают прибор через исток и сток. Этот этап можно назвать этапом установления стационарных процессов. На этом начальном этапе формируется область обедненного заряда под стоком.

В результате этого процесса поле у затвора нарастает, что приводит к наведению заряда смещения на затворе. На затворе отсутствует заряд или поток электронов, поскольку он их отражает, поэтому через некоторое время устанавливается состояние стационарного потока со стационарным распределением заряда, и среднее количество электронов, выходящих из истока, равно среднему количеству электронов, входящих в сток. Ток, проходящий через каждый электрод, задается выражением:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$$

Из-за больших флуктуаций в $Q(t)$ трудно получить надежную оценку для установившегося тока I_{ss} подгонкой прямой линии через реально полученный график зависимости заряда от времени. Однако величину I_{ss} можно корректно вычислить с помощью автокорреляции тока $I(t)$. При установившемся процессе ток может выражаться как сумма установившейся величины I_{ss} и тока

$i(t)$, обусловленного случайным шумом, который имеет среднее значение, равное нулю. Таким образом: $I(t) = I_{ss} + i(t)$. Величина $I(t)$ получается из зависимости $Q(t)$ дифференцированием по времени. Если обозначить через n временной слой, то

$$I^n = (Q^{n+1} - Q^n) / \Delta t,$$

где $I^n = I(n \cdot \Delta t)$ и $Q^n = Q(n \cdot \Delta t)$ — ток и заряд на n -м временном шаге и Δt — временной шаг.

Автокорреляционная функция определяется выражением: $A(\tau) = \frac{1}{N-n'} \sum_{n=1}^{N-n'} I^n I^{n+n'}$, где корреляционное время $\tau = n' \cdot \Delta t$ и всего имеется N шагов.

В результате получаем:

$$A(\tau) = \frac{1}{N-n'} \sum_{n=1}^{N-n'} I_{ss}^2 + \frac{1}{N-n'} \sum_{n=1}^{N-n'} i^n + \frac{1}{N-n'} \sum_{n=1}^{N-n'} i^{n+n'} + \frac{1}{N-n'} \sum_{n=1}^{N-n'} i^n i^{n+n'}$$

Первый член имеет постоянное значение I_{ss}^2 . Второй и третий члены представляют собой усреднение $i(t)$ по времени и поэтому стремятся к нулю при увеличении длины записи. Четвертый член — автокорреляция случайных флуктуаций и, следовательно, стремится к нулю при увеличении времени корреляции. Таким образом, установившийся ток получается из выражения: $I_{ss} = \sqrt{\lim A(\tau)}$, где предел берется при больших τ , что на практике означает $\tau > 1$ пс.

Ошибки, присущие измерению во втором, третьем и четвертом членах, могут снижаться усреднением $I(t)$ перед расчетом автокорреляции. Сглаженная величина $I_s(t)$ получается взятием скользящего среднего по m временным шагам: $I_s^n = \frac{1}{m} \sum_{n'=0}^{m-1} I^{n+n'}$.

Помимо вычисления и анализа статических характеристик, численное моделирование дает возможность наблюдать внутренние процессы в транзисторе способом, совершенно невозможным в лабораторных условиях. На каждом временном шаге координаты всех частиц доступны для наблюдения вместе с распределением электростатического потенциала по всему прибору. Эта информация может анализироваться, чтобы дать полное описание функции распределения и электрического поля в активной области прибора, что позволяет рассмотреть динамические явления при установлении рабочего режима.

Статические характеристики описывают стационарные токи, текущие под действием постоянных (т.е. статических) напряжений, приложенных к электродам. Они описывают поведение прибора при нулевой частоте или в условиях постоянного тока. Если мы хотим знать поведение прибора в любых условиях, необходимо исследовать ток в зависимости от приложенного напряжения на любой частоте. Тогда можно выразить реакцию прибора на любое изменение напряжений и иметь полное динамическое описание прибора. Параметры Y дают удобное динамическое описание выходных характеристик, которые можно использовать при расчетах усилителей на ПТШ.

Полученные результаты

Вид функций распределения, соответствующих начальному и установившемуся процессам, показан на рис.3 и 4. Полученные результаты полностью коррелируются с [1, 5].

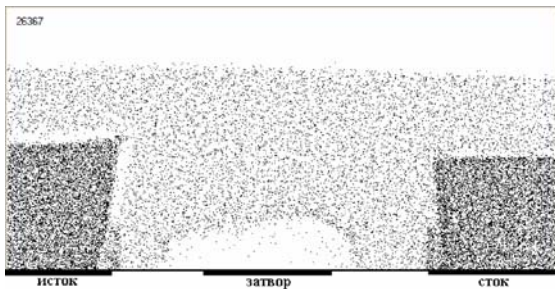


Рис.3. Процесс установления потока ($t=3$ пс)

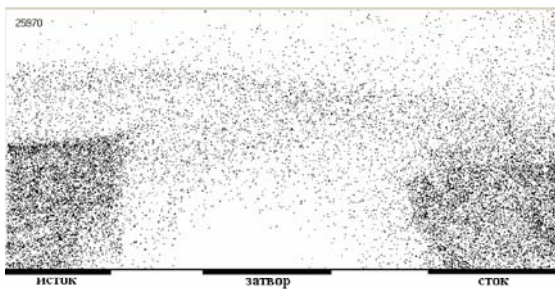


Рис. 4. Установившийся режим ($t>20$ пс)

Семейство выходных (стоковых) статических характеристик транзистора приведено на рис.5. Сплошные линии соответствуют длине затвора 0,2 мкм, длинный пунктир — 0,3 мкм, короткий пунктир — 0,06 мкм.

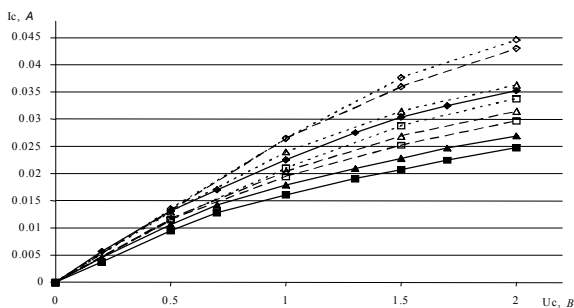


Рис. 5. Выходные (стоковые) характеристики: ■ — $U_3 = -0.6V$; ▲ — $U_3 = 0V$; ◆ — $U_3 = 0.4V$

Семейство проходных (сток-затворных) статических характеристик транзистора приведено на рис. 6. Результаты получены при напряжении на стоке 1,5 В.

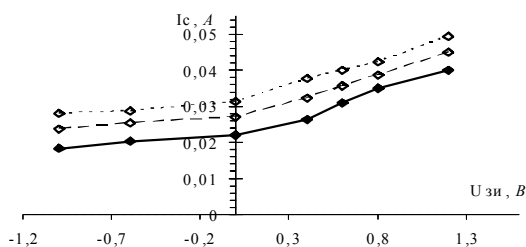


Рис. 6. Проходные (сток-затворные) характеристики

Полученные данные соответствуют характеристикам подобных транзисторов, измеренным и опубликованным в [1]. Это свидетельствует об адекватности предложенной численной модели ПТШ.

Выводы

На основе приведенных результатов, полученных с помощью компьютерного эксперимента, можно сделать вывод о том, что представленная модель адекватно описывает процессы, происходящие в микроструктурах полупроводниковых приборов, и имеет широкий диапазон возможностей. Ее можно использовать для исследования влияния геометрических параметров на интегральные характеристики транзистора, исследования шумовых свойств прибора, реакции прибора на импульс большой мощности, режима лавинного пробоя и т.д. Разработанная модель обладает неоспоримым преимуществом — в нее введен учет тепловых процессов в полупроводниковой структуре, а также проведен наиболее полный и адекватный охват процессов рассеяния носителей в структуре.

Литература: 1. Хокни Р., Иствуд Д. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 638 с. 2. Реклайтис А.С., Мицкявичус Р.В. Новое в жизни, науке, технике: Метод Монте Карло в физике полупроводников. М.: Знание, 1988. 38 с. 3. Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1975. 399с. 4. Ридли Б. Квантовые процессы в полупроводниках. М.: Мир, 1986. 304 с. 5. Потттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир, 1975. 392 с.

Поступила в редколлегию 12.05.2004

Рецензент: д-р физ.-мат наук, проф. Гордиенко Ю.Е.

Зуев Сергей Александрович, ассистент кафедры радиопрофизики ТНУ. Научные интересы: моделирование физических процессов в полупроводниковых приборах методом крупных частиц, исследование электронных и тепловых режимов работы полупроводниковых структур, в частности, полевых транзисторов. Адрес: Украина, 95004, Симферополь, ул. Киевская, 127, кв. 35, тел. раб. (0652) 230-360, дом. (0652) 573-683. E-mail: sa_zuev@tnu.crimea.ua.

Старостенко Владимир Викторович, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой радиопрофизики ТНУ. Научные интересы: моделирование вакуумных и твердотельных устройств СВЧ, исследование деградационных процессов в различных объектах и средах при воздействии электромагнитных полей. Адрес: Украина, 95022, Симферополь, ул.Б.Куна, 31, кв.13, тел.: раб. (0652)23-03-60, дом. (0652)57-54-01.

Терещенко Владимир Юрьевич, аспирант кафедры радиопрофизики ТНУ. Научные интересы: моделирование твердотельных устройств СВЧ, исследование воздействия электромагнитных полей на различные среды. Адрес: Украина, 95007, Симферополь, пр. Вернадского, 4, тел. (0652)23-03-60.

Чурюмов Геннадий Иванович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры ФЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: моделирование нелинейных устройств, СВЧ электроника, лазерная и оптоэлектронная техника. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-10-57.

Шадрин Анатолий Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры радиопрофизики ТНУ. Научные интересы: математическое моделирование процессов в вакуумных и твердотельных приборах и устройствах СВЧ. Адрес: Украина, 95007, Симферополь, пр. Вернадского, 4, тел. (0652)23-03-60.