

РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА С ДЛИНОЙ КАНАЛА 50 НМ

Д. В. Поздняков, А. В. Борздов, В. М. Борздов

Белорусский государственный университет, pozdneyakov@bsu.by

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время из-за продолжающейся миниатюризации приборных структур кремниевой наноэлектроники особенно острой стала проблема адекватного моделирования их функционирования. Это связано, в первую очередь, с тем, что разработанные для нужд микроэлектроники программные средства имеют размерные ограничения по параметрам, обусловленные использованием при создании этих средств различного рода приближений и упрощений в описании процесса переноса электронов. В результате, исключительно большое внимание стало уделяться расчетам электрических характеристик кремниевых наноприборов из первых принципов. Одним из методов, позволяющих проводить такие расчеты, является многочастичный метод Монте-Карло. Используемый в этом методе физико-математический аппарат фактически дает возможность проводить имитационный численный эксперимент, эквивалентный реальному физическому эксперименту, и отслеживать тончайшие физические эффекты. В связи с этим, целью настоящей работы стали, с одной стороны, расчет многочастичным методом Монте-Карло вольтамперных характеристик (ВАХ) кремниевых МОП-транзистора с длиной канала 50 нм и, с другой стороны, исследование влияния на эти ВАХ таких доминирующих в подобных наноструктурах механизмов рассеяния, как рассеяние носителей заряда на плазмонах, ионизированных атомах легирующей примеси и неоднородностях границы раздела Si/SiO₂ в подзатворной области [1–3].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В свое время в работах [4, 5] было теоретически исследовано влияние квантово-размерных эффектов на ВАХ кремниевых МОП-транзистора с длиной канала 50 нм. Как установили авторы этих работ, учет такого рода эффектов влечет за собой заметное уменьшение тока насыщения стока. Начальный участок ВАХ остается практически без изменений. Однако в работах [4, 5] не учитывались такие важные механизмы рассеяния, как рассеяние электронов на плазмонах, примесных ионах и неоднородностях (неровностях или, как их еще называют, шероховатостях) границы раздела Si/SiO₂ в подзатворной области проводящего канала транзистора. Более того, сами авторы данных работ подчеркнули, что, в частности, рассеяние носителей заряда примесными ионами должно практически полностью нивелировать квантово-размерные эффекты. И при определенных, достаточно больших уровнях легирования кремния можно ожидать отсутствия заметного влияния этих эффектов на ВАХ МОП-транзистора. В результате, за прототип нами был взят кремниевый МОП-транзистор с длиной канала 50 нм, аналогичный тому, что изучался в работах [4, 5]. Его схематический вид представлен на рис. 1.

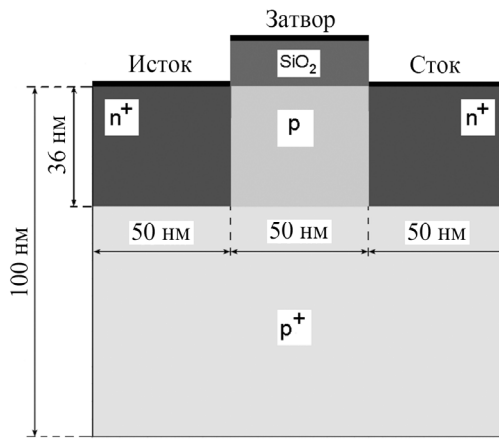


Рис. 1. Схематический вид моделируемого МОП-транзистора

Толщина SiO_2 полагалась равной 10 нм. Уровни легирования брались следующие: $N_D = 10^{25} \text{ м}^{-3}$ для n^+ -областей, $N_A = 5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ для p -области и $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ для p^+ -области. Считалось, что затворный электрод изготовлен из алюминия, а истоковый и стоковый электроды изготовлены из материала, обеспечивающего идеальный омический контакт этих электродов с n^+ -областями кремния.

При расчете ВАХ исследуемого трех-электродного транзистора многочастичным методом Монте-Карло моделировался ансамбль электронов из 250000 частиц. Для дырок использовалось квазиравновесное приближение. Рассматривались X- и L-долины кремния с учетом непараболичности. Квантоворазмерные эффекты не учитывались. Наряду с рассеянием электронов на акустических и оптических фонах [1–5] учитывалось их рассеяние на плазмонах в рамках описанной в [1] модели. Рассеяние электронов на примесных ионах учитывалось в рамках разработанной в [6] модели, но с использованием приближения экранированного кулоновского потенциала иона ионами, а не электронами. Рассеяние электронов на неоднородностях границы раздела Si/SiO_2 в подзатворной области рассматривалось в рамках классической модели их диффузного отражения от поверхности [3] с долей диффузно отраженных частиц равной 0.4. Доля зеркально отраженных электронов составляла, соответственно, 0.6.

На рис. 2 представлены результаты расчета ВАХ моделируемого транзистора. Приняты следующие обозначения: V_D — напряжение на стоке относительно истока, V_G — напряжение на затворе относительно истока, I_D — ток стока. Сплошные кривые — $V_G = 1.4 \text{ В}$. Штриховые кривые — $V_G = 1 \text{ В}$. Кривые 1 — расчет без учета рассеяния электронов на плазмонах, примесных ионах и неоднородностях границы раздела Si/SiO_2 . Кривые 2 — расчет с учетом соответствующих механизмов рассеяния. Кривые 3 — расчет с помощью программы Atlas программного комплекса Silvaco в рамках диффузионно-дрейфового приближения.

Из рис. 2 следует, что учтенные механизмы рассеяния электронов оказывают значительное влияние на ВАХ рассматриваемого МОП-транзистора. Тот факт, что начальные участки ВАХ, рассчитанных методом Монте-Карло, почти совпали с начальными участками ВАХ, рассчитанных с помощью программного комплекса Silvaco, подтверждает адекватность использованных нами моделей, поскольку при малых напряжениях на стоке в канале транзистора всегда устанавливается режим диффузионно-дрейфового переноса электронов независимо от длины его канала [3].

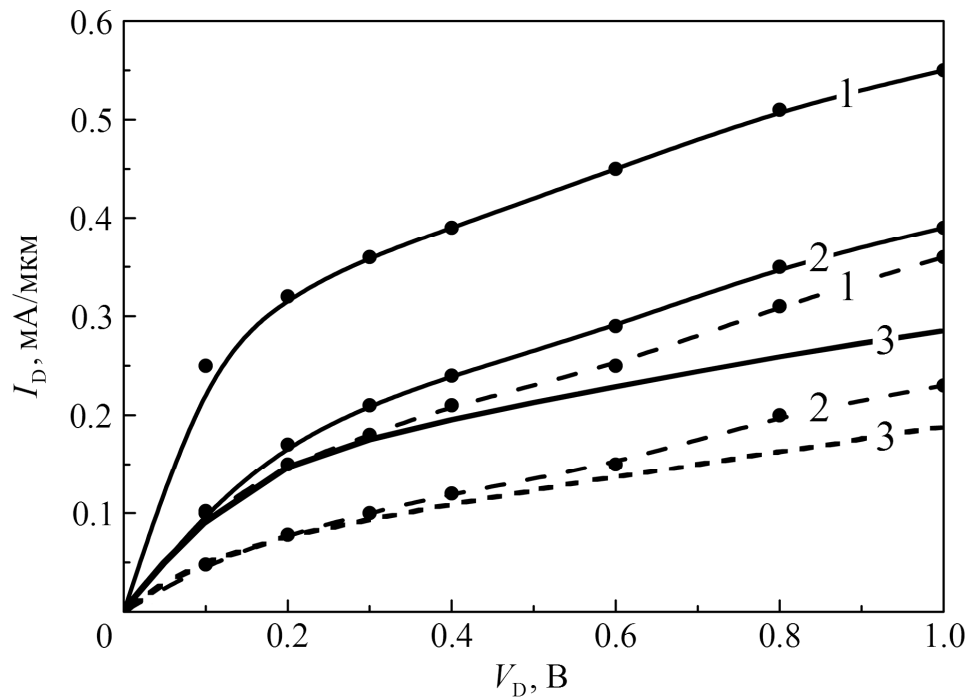


Рис.2. ВАХ моделируемого МОП-транзистора при комнатной температуре

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитаны методом Монте-Карло ВАХ кремниевого МОП-транзистора с длиной канала 50 нм. Исследовано влияние на эти ВАХ рассеяния электронов на плазмонах, примесных ионах и шероховатостях границы Si/SiO₂. Установлено, что это влияние настолько значительно, что пренебрежение соответствующими механизмами рассеяния электронов не позволит адекватно моделировать функционирование такого рода транзисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jacoboni, C.* The Monte Carlo method for semiconductor device simulation / C. Jacoboni, P. Lugli. Wien – New York: Springer – Verlag, 1989. 356 p.
2. Monte Carlo device simulation: full band and beyond / ed. by K. Hess. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. 310 p.
3. *Борздов, В. М.* Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. Мн.: БГУ, 2007. 175 с.
4. *Vasileska, D.* The role of quantization effects on the operation of 50 nm MOSFETs, 250 nm FIBMOS devices // *Physica status solidi (b)*. 2002. Vol. 233. No. 1. P. 127–133.
5. *Vasileska, D.* The role of quantization effects on the operation of 50 nm MOSFETs, 250 nm FIBMOS devices and narrow-width SOI device structures / D. Vasileska [et al.] // *Journal of computational electronics*. 2002. No. 1. P. 453–465.
6. *Kaiblinger-Grujin, G.* Influence of the doping element on the electron mobility in n-silicon / G. Kaiblinger-Grujin, H. Kosina, S. Selberherr // *Journal of applied physics*. 1998. Vol. 83. No. 6. P. 3096–3101.