

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ СТОКА НА ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНОВ И ТОК СТОКА В СУБМИКРОННЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Исследовано влияние глубины залегания стока в субмикронном МОП-транзисторе на ток стока и подвижность электронов в нем. В качестве основного метода исследования использовано кинетическое моделирование переноса электронов в проводящем канале МОП-транзистора на основе метода Монте-Карло. Только данный метод позволяет точно учесть влияние размеров области стока на изменение концентрации электронов и их подвижности вблизи данной области. Полученные результаты моделирования показывают, что с ростом глубины залегания стока подвижность электронов у стока почти не изменяется, тогда как величина тока стока заметно увеличивается. Это связано с изменением размеров обедненной области стока, которое практически не сопровождается усилением разогрева электронов.

Ключевые слова: субмикронный МОП-транзистор; подвижность электронов; ток стока; глубина залегания стока.

In present paper the effect of drain depth on drain current as well as electron mobility at the drain region is investigated. Monte Carlo simulation of electron transport in conducting channel of studied MOSFET's is chosen as a basic method for investigation. Only this method allows studying adequately the effect of drain depth on a change of electron concentration and mobility near the drain. Obtained simulation data prove that the increasing of drain depth is accompanied by the insignificant change of electron mobility and the significant growth of drain current. It is connected with the change of sizes of depleted drain region which does not lead to electron heating.

Key words: submicron MOS-transistor; electron mobility; drain current; drain depth.

Стремительное развитие технологии кремниевых ИС привело к созданию цифровых схем, использующих переключающие транзисторы с размерами 100 нм и менее [1–3]. Однако такие транзисторы, создаваемые на основе МОП-структур, оказываются очень чувствительными к малейшим конструктивным флуктуациям, что обычно проявляется в деградации рабочего тока, его дрейфе со временем, появлении паразитных токов [1–4]. В связи с этим разработка моделей, алгоритмов и программных средств, позволяющих исследовать влияние малых размеров активных элементов МОП-транзисторов на величину протекающих в этих приборах токов, является важной и актуальной задачей.

При анализе процессов в МОП-транзисторе принято считать, что напряжение, приложенное к затвору (V_G), создает поперечное поле, генерирующее канал, а напряжение, приложенное к стоку (V_D), обеспечивает продвижение носителей по каналу от истока к стоку. Но при очень малой глубине стокового перехода возможно появление дополнительной поперечной составляющей электрического поля, которая будет влиять на процессы переноса носителей в канале у стока.

Цель статьи – оценка влияния глубины залегания стока в короткоканальном кремниевом МОП-транзисторе на величину тока стока в нем, а также на значение средней подвижности электронов в проводящем канале транзистора. Для этого с помощью метода Монте-Карло осуществлено моделирование электронного переноса от истока к стоку в МОП-транзисторах с разными значениями длины канала (L_{ch}) и глубины залегания стоковой области (d_j). Распределение примеси кусочно-постоянное: концентрация акцепторной примеси в подложке и канале (N_A) равна $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрация донорной при-

меси в области стока и истока (N_D) – $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Ширина канала в моделируемых приборах (W_{ch}) – 2,2 мкм, толщина подзатворного окисла (d_{ox}) – 3,6 нм.

В процессе моделирования были использованы известные алгоритмы и процедуры кинетического моделирования методом Монте-Карло, разработанные одним из авторов и описанные в работах [5, 6]. Величина тока стока рассчитывалась путем интегрирования плотностей дрейфовой и диффузионной составляющих тока электронов, проходящего через металлургическую границу стокового перехода. Помимо зависимостей величины тока стока от глубины залегания стоковой области в настоящей работе были рассчитаны зависимости подвижности электронов от величины d_j . Результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2. Распределения средних значений подвижностей электронов рассчитывались вдоль длины канала в направлении от истока к стоку (рис. 1, а) и у стокового p - n -перехода (рис. 1, б). В последнем случае для анализа влияния стокового напряжения на подвижность электронов в приборе с $L_{ch} = 0,25$ мкм получены зависимости для трех разных значений V_D . На рис. 2 при численном моделировании значения тока стока для приборов с d_j , равные 8 и 50 нм, сравниваются с экспериментальными зависимостями, взятыми из работы [7] и измеренными для МОП-транзистора с $d_j = 150$ нм. Приведенные результаты расчетов позволяют отметить следующие особенности.

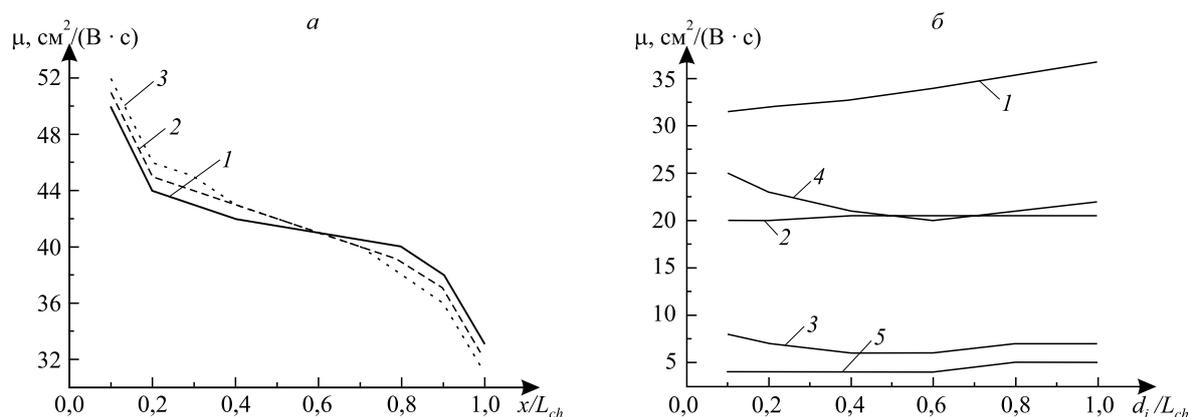


Рис. 1. Средняя подвижности электронов: а – вдоль канала для МОП-транзисторов с $L_{ch} = 0,25$ мкм при $V_D = 1,5$ В и $V_G = 2$ В для $d_j = 150$ нм (1), 50 нм (2), 8 нм (3); б – у стока при $V_G = 2$ В для приборов с $L_{ch} = 0,25$ мкм при $V_D = 1,5$ В (1), $V_D = 2$ В (2), $V_D = 2,5$ В (3) и при $V_D = 2,5$ В для транзисторов с $L_{ch} = 0,5$ мкм (4) и $L_{ch} = 0,1$ мкм (5)

Во-первых, глубина залегания стока относительно слабо влияет на распределение средних значений подвижности электронов вдоль канала исследуемых приборов. Необходимо, однако, отметить факт некоторого уменьшения подвижности у истока и повышения ее значений у стока с ростом величины d_j . Более заметное влияние глубины залегания стока на величину подвижности у стока наблюдается только для МОП-транзисторов с длиной канала 0,5 мкм (см. рис. 1, б).

Во-вторых, с ростом V_D величина подвижности у стока заметно уменьшается (см. рис. 1, б). Для приборов с $L_{ch} = 0,25$ мкм изменение этого напряжения от 1,5 до 2,5 В обуславливает в целом более чем трехкратное уменьшение значения подвижности. Это вызвано значительным увеличением напряженности электрического поля у стока, что приводит к сильному разогреву электронов в этой области и снижению их подвижности вследствие резкого усиления процессов рассеяния в ней.

В-третьих, увеличение глубины залегания стоковой области оказывает более заметное влияние на величину тока стока, с ростом d_j значение тока стока растет. При этом приложенные к затвору и стоку напряжения не изменяют характер этого влияния. Результаты, полученные при моделировании вольт-амперной характеристики (ВАХ), свидетельствуют, что для рассмотренных условий изменение значения d_j оказывает более существенное влияние на различие расчетных значений тока стока с его экспериментальными значениями для тестового транзистора, нежели изменение V_D или V_G .

Поскольку интенсивность разогрева электронов с увеличением глубины залегания стока практически не возрастает (средняя подвижность электронов у стока с увеличением d_j изменяется слабо), то более явно выраженную зависимость ве-

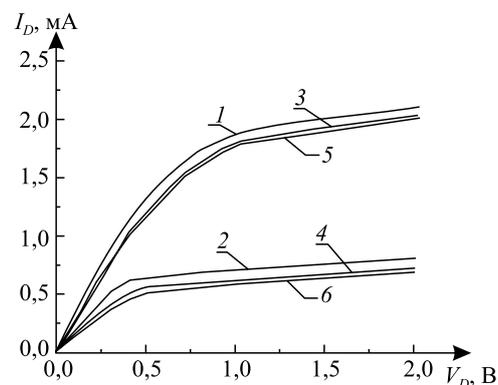


Рис. 2. Ток стока для транзисторов с $d_j = 150$ нм (1, 2), 50 нм (3, 4) и 8 нм (5, 6). Для ВАХ с нечетными номерами $V_G = 2$ В, с четными номерами $V_G = 1$ В

личины тока стока от величины d_j , по сравнению с аналогичной для подвижности электронов, можно объяснить только тем, что величину данного тока определяет общее количество электронов у стока, которое за счет увеличения размеров его обедненной области должно заметно возрасть.

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло проанализировано влияние на ток стока в короткоканальном МОП-транзисторе глубины залегания в нем области стока. Полученные результаты показывают, что с увеличением глубины залегания величина тока стока возрастает, однако это связано в первую очередь с изменением обедненной области стока, а не с усилением разогрева электронов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fiegna C., Iwai H., Wada T., Saito M., Sangiorgi E., Ricco B. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements // IEEE Trans. Electron Dev. 1994. Vol. 41, № 6. P. 941–951.
2. Iwai H., Momose H. S. Technology toward low power / low voltage and scaling of MOSFETs // Microelectron. Engineer. 1997. Vol. 39, № 1. P. 7–30.
3. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. М., 2002. Ч. 1 : Техносфера.
4. Matsuoka F., Kasai K., Oyamatsu H., Kinugawa M., Maeguchi K. Drain structure optimization for highly reliable deep submicrometer n-channel MOSFET // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. Vol. 41, № 3. P. 420–425.
5. Борздов В. М., Жевняк О. Г., Комаров Ф. Ф., Галенчик В. О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. Минск, 2007.
6. Zhevnyak O. Temperature effect on electron transport in conventional short channel MOSFETs: Monte Carlo simulation // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7025. P. 1M-1–8.
7. Jeng M.-C., Chung J., Wu A. T., Chan T. Y., Moon J., May G., Ko P. K., Hu C. Performance and hot-electron reliability of deep-submicron MOSFET'S // IEDM. 1989. № 1. P. 710–713.

Поступила в редакцию 07.07.2014.

Олег Григорьевич Жевняк – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники и нанотехнологий.

Игорь Михайлович Шевкун – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерных систем.