

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПАРАЗИТНОГО ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О. Г., Борздов В. М., Борздов А. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Email: Zhevnyakol@tut.by

В настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, лежащих в основе работы современных элементов флеш-памяти, рассчитаны зависимости относительной величины паразитного туннельного тока от координаты вдоль проводящего канала транзистора. Рассмотрено влияние на них изменения формы потенциального барьера вдоль канала, а также энергии и дрейфовой скорости электронов. Показано, что эти зависимости имеют слабо выраженный U-образный вид.

Ключевые слова: флеш-память; туннельный ток; метод Монте-Карло.

Одной из основных тенденций современных флеш-технологий является уменьшение размеров элементов флеш-памяти [1]. Но при этом недопустимо повышение паразитных туннельных токов в них, приводящих к искажению хранящейся в этих элементах информации (см., например, [2]). Целью настоящего исследования явилось моделирование методом Монте-Карло пространственного распределения относительной величины паразитных туннельных токов в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом флеш-памяти, вдоль их проводящего канала. Алгоритмы такого моделирования описаны в работе [3], а процедура расчета туннельного тока из проводящего канала на плавающий затвор рассмотрена в работе [4].

На рис. 1 приведена конструктивная схема моделируемого элемента флеш-памяти. В настоящей работе приведены результаты моделирования для прибора со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{окс} = 7$ нм, толщина туннельного окисла $d_{тун} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{плав} = 2$ нм, глубины залегания истоковой и стоковой областей в подложку $d_j = 50$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26}$ м⁻³, напряжения на стоке и затворе $V_D = 2$ В, $V_G = 2$ В.

Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела Si/SiO₂ и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. Плотность этого тока численно может быть рассчитана согласно формуле

$$j = eN_n Dv dr ,$$

где e – заряд электрона, N_n и v_{dr} – концентрация и дрейфовая скорость электронов, находящихся у границы раздела Si/SiO₂, D – коэффициент туннелирования, определяемый величиной энергии электронов E , высотой барьера H на границе раздела Si/SiO₂ и разностью уровней дна зон проводимости в канале и на плавающем затворе ΔU .

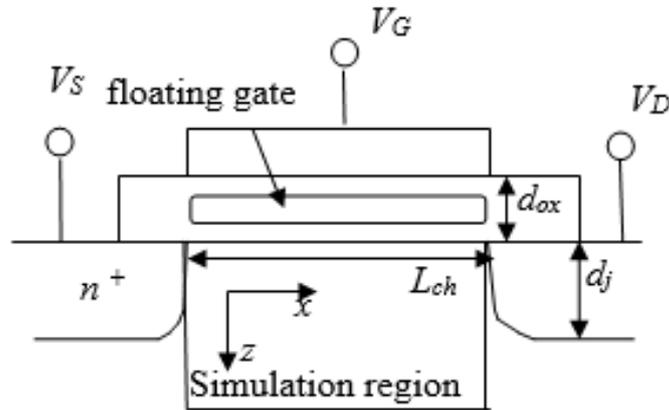


Рис. 1. Конструктивная схема рассматриваемого элемента флеш-памяти и область моделирования

Величины N_n , v_{dr} и E вычисляются с помощью стандартных процедур метода Монте-Карло. Величина ΔU прямо пропорциональна величине электрического потенциала в проводящем канале и определяется с помощью самосогласованного решения уравнения Пуассона. На рис. 2 приведены три диаграммы, поясняющие характер изменения этой величины вдоль канала и показано, как она определяет форму потенциального барьера между плавающим затвором и каналом, который и регулирует процесс формирования паразитного туннельного тока.

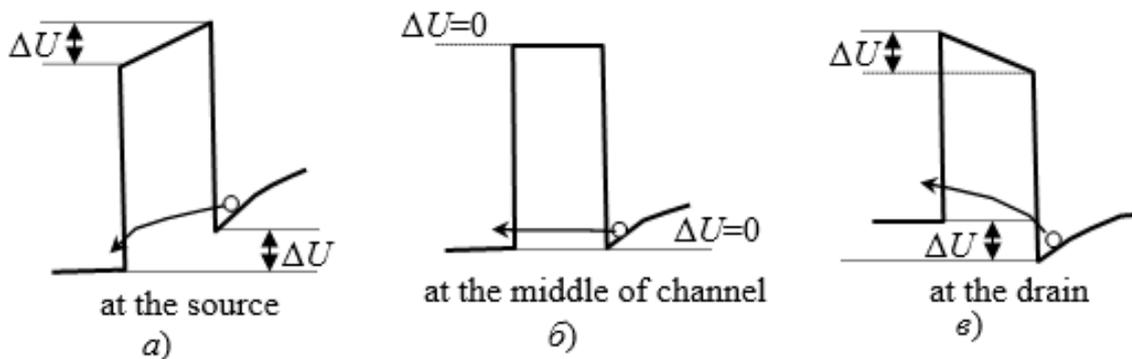


Рис. 2. Энергетическая диаграмма изменения вида барьера на границе Si/SiO₂ вдоль проводящего канала:

а - у истока, б - в середине канала, в - у стока

Высота барьера H для рассматриваемого элемента флеш-памяти равнялась 3,2 эВ. Значения величин N_n , v_{dr} , E и ΔU существенно изменяются вдоль канала, при этом величина ΔU , как легко видеть из рис. 2, вообще меняет свой знак на противоположный. Поведения этих величин и определяют закономерности пространственного распределения величины паразитного туннельного тока в элементах флеш-памяти.

Нами рассчитаны зависимости вдоль канала относительной величины паразитного туннельного тока для МОП-транзисторов с плавающим затвором для приборов с разной длиной проводящего канала, глубиной залегания истоковой и стоковой областей, концентрацией акцепторной области. Для примера на рис. 3, б приведена полученная зависимость $J_{\text{tun}}/J_{\text{drain}}$ для транзистора с $L_{ch} = 0,2$ мкм, $d_j = 50$ нм и концентрацией $N_A = 10^{24}$ м⁻³. Для сравнения на этом же рисунке (рис. 3, а) приведена зависимость изменения величины коэффициента D , рассчитанная для среднестатистических электронов, имеющих среднюю энергию и находящихся у границы раздела Si/SiO₂ в соответствующем сечении канала.

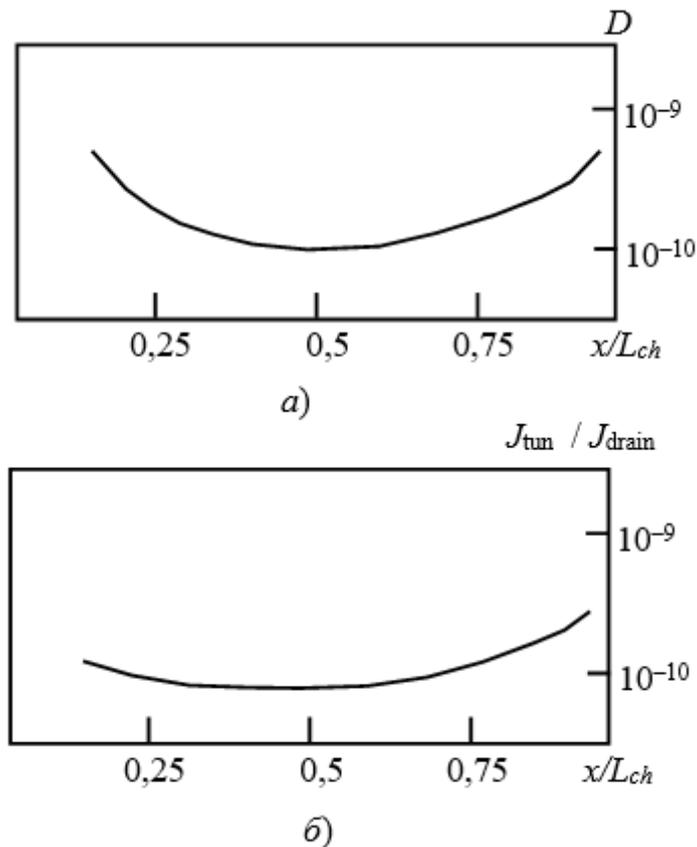


Рис. 3. Изменения вдоль канала моделируемого элемента флеш-памяти значений коэффициента туннелирования (а) и относительной величины туннельного тока на плавающий затвор (б)

Между кривыми прослеживается очевидная корреляция. Характерная U-образная зависимость коэффициента D обусловлена изменением знака ΔU с положительного на отрицательный при изменении потенциала в канале от истока к стоку (приводит к уменьшению D) и ростом энергии электронов E вдоль канала (приводит к увеличению D) – на начальном участке преобладает первое явление, на конечном второе. Для относительной величины паразитного туннельного тока U-образная зависимость выражена несколько слабее. Это обусловлено тем, что на данную величину помимо коэффициента D влияние оказывает ряд других параметров и, прежде всего, величина дрейфовой скорости, которая в начале канала очень мала.

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования электронного переноса методом Монте-Карло рассчитаны зависимости вдоль канала относительной величины паразитного туннельного тока. Установлено, что эти зависимости имеют слабо выраженный U-образный вид, обусловленный особенностями паразитного туннелирования электронов в рассматриваемых элементах, и изменениями вдоль проводящего канала транзистора величин концентрации электронов, их энергии и дрейфовой скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. *Hu C. (ed.) Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications.* Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991. P. 167.
2. *De Salvo B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation.* London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. P. 256.
3. *Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О.* Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. Минск: БГУ; 2007. С. 175.
4. *Жевняк О. Г.* Моделирование паразитных туннельных токов в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов // Eurasian union of Scientists (ЕСУ). 2020. № 76, Ч. 2. С. 26–28.