

# Моделирование неоднородности паразитного туннельного тока в элементах флеш-памяти

<sup>1</sup> Жевняк О. Г., <sup>1</sup> Борздов А. В., <sup>1</sup> Борздов В. М., <sup>2</sup> Абрамов И. И.

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
г. Минск, 220030, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь  
borzдов@bsu.by

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, 220013, ул. П. Бровки, 6, Республика Беларусь

**Аннотация:** В настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовыми элементами современных микросхем флеш-памяти, рассчитаны зависимости от координаты вдоль проводящего канала абсолютных и относительных величин паразитного туннельного тока. Показано, что наибольшее влияние на поведение полученных зависимостей оказывают распределения вдоль канала средней энергии электронов и разности уровней дна зон проводимости в кремнии и на плавающем затворе транзистора.

## 1. Введение

Дальнейший прогресс в области флеш-технологий направлен на уменьшение размеров элементов флеш-памяти, построенных на основе короткоканальных МОП-транзисторов с плавающим затвором [1]. Однако, уменьшение размеров активных областей этих приборов, в частности, длины проводящего канала и толщины туннельных оксидов, разделяющих канал и плавающий затвор, где хранится бит информации, будет способствовать резкому повышению паразитного туннельного тока, что крайне нежелательно, так как может привести к искажению хранящейся в этих элементах информации (см., например, [2]). Целью настоящего исследования явилось моделирование методом Монте-Карло пространственного распределения величины паразитных туннельных токов в данных транзисторах вдоль проводящего канала. Алгоритмы такого моделирования описаны в работе [3], а процедура расчета туннельного тока, направленного из проводящего канала на плавающий затвор рассмотрена в работах [4,5].

## 2. Особенности моделирования и результаты

Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. Плотность этого тока количественно может быть рассчитана согласно формуле

$$j = eN_n v_{dr},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $N_n$  и  $v_{dr}$  – концентрация и дрейфовая скорость электронов, находящихся у границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>,  $D$  – коэффициент туннелирования, определяемый величиной энергии электронов  $E$ , высотой барьера  $H$  на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> и разностью  $\Delta U$  между уровнями дна зон проводимости, соответствующих каналу и плавающему затвору. Величины  $N_n$ ,  $v_{dr}$  и  $E$  вычисляются с помощью стандартных процедур метода Монте-Карло. Величина  $\Delta U$  прямо пропорциональна величине электрического потенциала в проводящем канале и определяется с помощью самосогласованного решения уравнения Пуассона. Высота барьера  $H$  для рассматриваемого примера элемента флеш-памяти равнялась 3.2 эВ. Значения величин  $N_n$ ,  $v_{dr}$ ,  $E$  и  $\Delta U$  существенно изменяются вдоль канала, при этом величина  $\Delta U$  меняет свой знак на противоположный — у истока она положительна (так как минимум дна зоны проводимости в канале у истока МОП-транзистора с плавающим затвором расположен выше соответствующего минимума дна на плавающем затворе), тогда как у стока она отрицательна (расположение уровней минимума зон меняется вследствие воздействия потенциала стока, который заметно понижает минимум дна зоны проводимости канала).

На рис. 1 приведены полученные в результате численного моделирования зависимости вдоль канала средней энергии электронов  $E$  и разности уровней  $\Delta U$ , рассчитанных для транзистора с длиной канала 0.2 мкм, толщиной туннельного оксида 2 нм, напряжениями на стоке и затворе, равными 2 В, и концентрацией акцепторной примеси в подложке, равной  $10^{24}$  м<sup>-3</sup>. Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод о том, что зависимость величины паразитного туннельного тока вдоль проводящего канала должна иметь неоднородный характер, так как значения  $E$  и  $\Delta U$  по-разному влияют на коэффициент  $D$ .

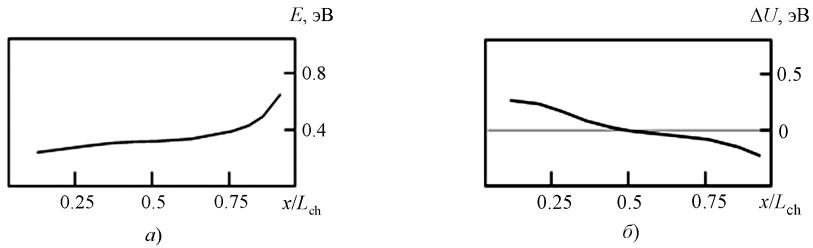


Рис. 1. Зависимости вдоль проводящего канала рассматриваемого МОП-транзистора с плавающим затвором средних значений энергии (а) и разницы уровней дна зон проводимости (б)

На рис. 2 приведены рассчитанные в результате моделирования зависимости относительной и абсолютной величин паразитного туннельного тока вдоль проводящего канала. Как видно, величина первой зависимости в целом возрастает, что свидетельствует о преобладающем влиянии роста энергии первой зависимости в целом возрастает, что свидетельствует о преобладающем влиянии роста энергии электронов вдоль канала на величину паразитного туннельного тока. Кривая же второй зависимости заметно уменьшается, имея некоторую неоднородность в середине канала. Эта неоднородность обусловлена поведением плотности дрейфового тока вблизи поверхности туннельного оксида, величина которой с середины канала начинает заметно уменьшаться, так как электроны в канале начинают уходить вглубь подложки и их концентрация у поверхности резко снижается.

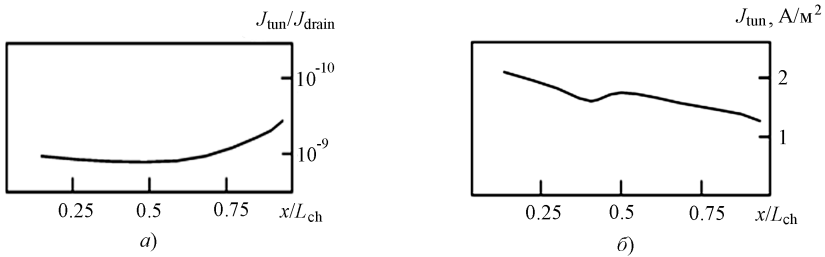


Рис. 2. Изменения вдоль канала моделируемого элемента флеш-памяти средних значений отношения величины паразитного туннельного тока к величине дрейфового тока (а) и абсолютной величины туннельного тока (б)

### 3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе с помощью численного моделирования методом Монте-Карло электронного переноса рассчитаны зависимости вдоль канала короткоканального МОП-транзистора с плавающим затвором абсолютной и относительной величины паразитного туннельного тока. Показано, что они носят неоднозначный характер. Наибольшее влияние на данные зависимости оказывают значения энергии электронов, их концентрация вблизи туннельного оксида и взаимное расположение дна зоны проводимости в канале и на плавающем затворе. Данные особенности формирования паразитного туннельного тока необходимо учитывать при проектировании перспективных элементов флеш-памяти.

### Список литературы

1. Ну С. (ed.) Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991. 167 pp.
2. De Salvo B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation. London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. 256 pp.
3. Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. Минск: БГУ; 2007 – 175 с.
4. Жевняк О. Г. Моделирование туннельного тока в элементах флеш-памяти // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. Вып. 9, Ч. 3. С. 49–53.
5. Жевняк О. Г., Борздов В. М., Борздов А.В. и др. Моделирование электрофизических параметров элементов флеш-памяти методом Монте-Карло // Приборы и методы измерений. 2022. Т. 13. № 4. С. 276–280.