

УДК 621.382

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ ПЛАВАЮЩЕГО ЗАТВОРА НА ПАРАЗИТНОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О. Г.

Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Методом Монте-Карло проведено моделирование переноса электронов в элементах флеш-памяти на основе МОП-транзисторов с плавающими затворами разных типов проводимости. Рассчитаны зависимости величины паразитного туннельного тока от координаты вдоль проводящего канала транзистора. Рассмотрено влияние на них уровня легирования плавающего затвора и показано, что эти зависимости имеют слабо выраженный  $U$ -образный вид.

**Ключевые слова:** элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, паразитный туннельный ток, метод Монте-Карло.

## SIMULATION OF EFFECT OF FLOATING GATE CONDUCTIVITY ON A VALUE OF PARASITIC TUNNEL CURRENT IN FLASH MEMORY

Zhevnyak O.

Belarusian State University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Electron transport in silicon flash memory elements based on MOSFETs with floating gates with different type of conductivity is simulated by Monte Carlo method. The dependencies of value of parasitic tunnel current along the transistor's channel are calculated. The effect of doping of floating gate on obtained dependencies is considered. It is shown that these dependencies have  $U$ -type behavior.

**Key words:** flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, parasitic tunnel current, Monte Carlo simulation.

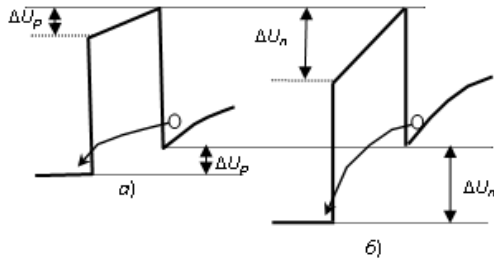
Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, г. Минск 220036, Республика Беларусь  
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

**Введение.** Тенденции развития современных флеш-технологий направлены на уменьшение размеров проводящих областей кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором, хранящим бит информации [1]. Однако, с уменьшением толщины изолирующих слоев и длины проводящих каналов в такого рода приборах заметно усиливается паразитный туннельный ток, что может привести к искажению хранящейся в этих элементах памяти информации (см., например, [2]). Разработка конструкции плавающего затвора – один из способов недопущения этого.

**Используемая модель.** В настоящей работе нами исследовался короткоканальный  $n$ -МОП-транзистор с плавающим затвором, образующий элемент флеш-памяти, 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  $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$ , напряжения на стоке и затворе  $V_D = 2$  В,  $V_G = 2$  В. Рассматривались три случая плавающего затвора, созданного на основе кремния  $p$ -типа с акцепторной примесью  $10^{24} \text{ м}^{-3}$ , кремния с собственной проводимостью и, следовательно, с концентрацией электронов  $10^{16} \text{ м}^{-3}$ , и кремния  $n$ -типа с концентрацией электронов  $10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. На рисунке 1 приведена энергетическая диаграмма, поясняющая особенности процесса паразитного туннелирования на плавающий затвор, сформированный из кремния разного типа проводимости. Чем выше концентрация свободных электронов в плавающем затворе, тем ниже расположен уровень дна зоны проводимости в нем и тем больше разница уровней между плавающим затвором и проводящим каналом  $\Delta U$ . Для плавающего затвора  $p$ -типа она минимальна ( $\Delta U_p$ ), для плавающего затвора  $n$ -типа она максимальна ( $\Delta U_n$ ). Для плавающего затвора из собственного кремния (на рисунке 1 он не приведен), очевидно, уровень  $\Delta U_i$  находится точно посередине между  $\Delta U_p$  и  $\Delta U_n$ . Тип проводимости плавающего затвора никоим образом не изменяет ни уровень дна зоны проводимости в канале транзистора, ни высоту потенциального барьера на границе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , ни его ширину, что и отражено на рис.1. Однако, ход потенциала в глубь подложки (слева на рис 1) слегка изменяется, так как изменяется соотношение потенциалов на границе областей с учетом прикладываемого к затвору напряжения.

Значения  $\Delta U_p$  и  $\Delta U_n$  зависят от уровня легирования подложки и напряжения на затворе и стоке. В рассматриваемых условиях для  $V_D = 0$  В они равнялись около 0,4 В и 1,2 В.



а – для затвора pSi; б – для затвора nSi

Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма потенциального барьера на границе Si/SiO<sub>2</sub> в отсутствии напряжения на стоке

Увеличение перепада высот со стороны канала на плавающий затвор для затворов *n*-типа не может не вызвать усиление паразитного туннелирования. Простые аналитические вычисления показывают, что темп туннелирования возрастет с  $D(E) \sqrt{\frac{E+\Delta U_p}{E}}$  для плавающих затворов *p*-типа до  $D(E) \sqrt{\frac{E+\Delta U_n}{E}}$  для плавающих затворов *n*-типа. Здесь  $E$  – энергия туннелирующего электрона,  $D(E)$  – коэффициент туннелирования для электрона с данной энергией.

Моделирование влияния типа проводимости плавающего затвора на величину паразитного туннельного тока в настоящей работе осуществлялось с помощью кинетического моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в проводящем канале рассмотренного элемента флеш-памяти. Такое моделирование позволяет найти как изменение величины энергии электронов вдоль проводящего канала и рассчитать  $D(E)$ , так и определить изменения вдоль канала величин  $\Delta U_p$ ,  $\Delta U_i$  и  $\Delta U_n$  с помощью самосогласованного решения уравнения Пуассона в канале транзистора и на границе разделов соответствующих областей. Стоит отметить, что напряжение на стоке понижает уровень дна зоны проводимости в канале, а, значит, уменьшает значения  $\Delta U_p$ ,  $\Delta U_i$  и  $\Delta U_n$ . Алгоритмы моделирования методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона приведены в нашей работе с соавторами [3]. Процедуры расчета величины  $D(E)$  описаны в нашей работе [4].

**Результаты моделирования и их обсуждение.** На рисунке 2 приведены полученные нами зависимости от координаты вдоль проводящего канала (в направлении от истока к стоку) в рассматриваемых МОП-транзисторах величины

паразитного туннельного тока, полученные для плавающих затворов трех разных типов.

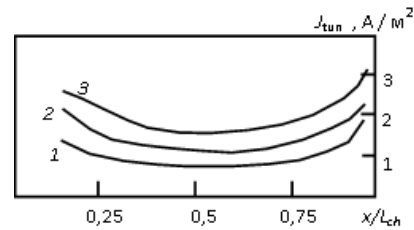


Рисунок 2 – Изменения вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти величины паразитного туннельного тока на плавающий затвор, сформированный из кремния *p*-типа (1), собственного кремния (2) и кремния *n*-типа (3)

Анализ поведения кривых позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, полученные зависимости имеют *U*-образный вид. Уменьшение величины тока в направлении от истока к середине проводящего канала связано с уменьшением вдоль канала величины  $\Delta U$ . Рост же величины тока вблизи стока обусловлен увеличением энергии электрона при их разогреве и увеличением значения  $D(E)$ . Во-вторых, величина паразитного тока для плавающих затворов *n*-типа в среднем в два раза выше, нежели для затворов *p*-типа.

**Заключение.** Таким образом, с помощью кинетического моделирования электронного переноса методом Монте-Карло были рассчитаны зависимости вдоль канала величины паразитного туннельного тока. Изучено влияние на них уровня легирования плавающего затвора. Показано, что для *n*-канальных МОП-транзисторов минимальное значение этого тока наблюдается для плавающих затворов, созданных на основе кремния *p*-типа.

#### Литература

1. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 p
2. Fiegna, C. Scaling the MOS Transistor Below 0.1  $\mu\text{m}$ : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna, H. Iwai, T. Wada, M. Saito, E. Sangiorgi, and B. Ricco // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – V. 41, № 6. – P. 941–951.
3. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов, О. Г. Жевняк, Ф. Ф. Комаров, В. О. Галенчик. – Минск: БГУ, 2007. – 175 с.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование влияния глубины залегания стока на паразитные туннельные токи в элементах флеш-памяти / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В. Борздов // Евразийский Союз ученых. Серия: техн. и физ.-мат. науки. 2021. – Т. 1, № 12. – С. 58–61.