Моделирование влияния затворного напряжения на плотность паразитного туннельного тока в элементах флеш-памяти

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

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: <u>zhevnyakog@mail.ru</u>

С помощью кинетического моделирования электронного переноса в элементах флешпамяти методом Монте-Карло исследовано влияние затворного напряжения на величину плотности паразитного туннельного тока на плавающий затвор в этих структурах. Показано, что в рассматриваемых условиях с увеличением напряжения на затворе меняется характер зависимости величины данного тока вдоль проводящего канала элемента флеш-памяти.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти; метод Монте-Карло; паразитный туннельный ток.

Simulation of gate bias effect on parasitic tunnel current in flash-memory cells

O. G. Zhevnyak, A. V. Borzdov, V. M. Borzdov

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: <u>zhevnyakog@mail.ru</u>

By using Monte Carlo simulation of electron transport in flash-memory cells the gate bias effect on density of parasitic tunnel current in such structures is studied. It is shown that under studied conditions the behavior of parasitic tunnel current density dependencies along the channel is changed with increasing gate bias.

Keywords: flash-memory cell; Monte Carlo simulation; parasitic tunnel current.

Введение

В современных элементах флеш-памяти с уменьшением размеров активных областей одной из важнейших проблем является недопущение возникновения в них высоких уровней паразитного туннельного тока, что приведет к искажению хранящейся в этих элементах памяти информации. Моделирование электронных явлений, приводящих к возникновению такого паразитного тока, является важной и актуальной задачей при проектировании микросхем флеш-памяти с более высоким объемом памяти [1, 2].

В настоящей статье с помощью кинетического моделирования электронного переноса в проводящем канале кремниевого МОП-транзистора с плавающим затвором, который лежит в основе современных элементов флеш-памяти, проведено исследование влияния затворного напряжения на величину плотности паразитного туннельного тока на плавающий затвор и рассчитаны зависимости этой величины вдоль проводящего канала транзистора.

1. Моделирование паразитного туннельного тока

На рис. 1 приведена энергетическая диаграмма МОП-транзистора с плавающим затвором, которая поясняет вопрос возникновения паразитного туннельного

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

тока в режиме считывания информации: при дрейфе электронов от истока к стоку вблизи границы раздела Si/SiO₂ они имеют отличную от нуля вероятность туннелирования из проводящего канала на плавающий затвор. На величину этой вероятности положительное влияние оказывают параметр ΔV_g , определяющий разницу между уровнями дна зон проводимости в канале и плавающем затворе, и энергия электронов *E*. С ростом величины двух этих параметров темп паразитного туннелирования заметно увеличивается. Следовательно, при проектировании перспективных элементов флеш-памяти необходимо не допускать увеличения величин ΔV_g и *E*.



Рис. 1. Энергетическая диаграмма моделируемого элемента флеш-памяти

Целью настоящего доклада является исследование влияния величины затворного напряжения на зависимости вдоль проводящего канала МОП-транзистора с плавающим затвором плотности паразитного туннельного тока. Очевидно, что на эту плотность помимо величин ΔV_g и *E* существенное влияние будет оказывать и плотность дрейфового тока вблизи границы раздела Si/SiO₂ (т. е. количество движущихся вдоль нее электронов). Расчет плотности электронных токов, в том числе паразитных, осуществлялся на основе моделирования электронного переноса в канале МОП-транзистора методом Монте-Карло и самосогласованного решения соответствующего уравнения Пуассона. Алгоритмы такого моделирования описаны в работе [3], а процедура расчета туннельного тока на плавающий затвор рассмотрена в работе [4, 5]. Исследовался элемент флеш-памяти со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0.25$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{\text{окс}} = 8$ нм, толщина туннельного окисла $d_{\text{тун}} = 2$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26}$ м⁻³, а акцепторной в подложке $N_A = 10^{24}$ м⁻³, глубина залегания областей истока и стока в подложку $d_j = 50$ нм. Напряжение на стоке $V_D = 2$ В. Рассматривались три случая напряжения на затворе: $V_G = 1$ В (на приведенных ниже зависимостях соответствует непрерывным линиям), $V_D = 2 B$ (соответствует штриховым линиям) и $V_D = 2 B$ (соответствует пунктирным линиям на рисунках).

Величина плотности паразитного туннельного тока рассчитывалась как доля плотности дрейфового тока, которую составляла доля тех электронов, движущихся

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

у границы раздела канал – туннельный оксид, для которых коэффициент туннелирования из канала на плавающий затвор был отличен от нуля (превышал величину 10⁻¹¹). Плотность дрейфового тока рассчитывалась по известной формуле:

$$j = eNv_{dr}$$
,

где $j = eNv_{dr}$ – величина заряда электрона, N – концентрация электронов в рассматриваемом сечении канала, v_{dr} – среднее значение дрейфовой скорости электронов в конкретной точке данного сечения.

2. Результаты моделирования

На рис. 2–4 приведены некоторые из полученных нами в результате моделирования зависимостей. Все приведенные данные получены для сечения канала у границы раздела канал – туннельный оксид. Из поведения кривых на рис. 2 и рис. 3 можно сделать вывод о влиянии затворного напряжения на изменение вдоль проводящего канала плотности дрейфового тока. Концентрация электронов вдоль канала для рассматриваемых условий уменьшается от трех раз для $V_G = 1$ В до 7 раз для $V_G = 3$ В, тогда как величина дрейфовой скорости в среднем увеличивается в 2 раза. Следовательно, плотность дрейфового тока вдоль проводящего канала заметно уменьшается.



Рис. 2. Зависимость концентрации электронов в канале МОП-транзистора у границы раздела Si/SiO₂



Рис. 3. Зависимость дрейфовой скорости электронов в канале МОП-транзистора у границы раздела Si/SiO₂

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.

На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости вдоль канала величины плотности паразитного туннельного тока, которые, однако, не демонстрируют столь однозначного поведения. Для $V_G = 1$ В плотность паразитного тока вдоль канала тоже уменьшается, но для $V_G = 2$ В и $V_G = 3$ В она начинает расти. Это обусловлено значительным увеличением доли туннелирующих электронов вследствие роста средней энергии (дрейфовой скорости)



Рис. 4. Зависимость величины плотности паразитного туннельного тока. Для сравнения плотность дрейфового тока в среднем в 10⁹ раз больше

электронов вдоль канала, несмотря на уменьшение числа дрейфующих вдоль этого направления электронов. Общий же рост величины плотности паразитного туннельного тока с ростом затворного напряжения вызван увеличением концентрации инверсных электронов в проводящем канале и увеличением падения напряжения в туннельном оксиде.

3. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведено моделирование влияния затворного напряжения на величину плотности паразитного туннельного тока в элементе флеш-памяти на основе МОП-транзистора с плавающим затвором. Показано, что для рассматриваемых условий с ростом затворного напряжения данная величина начинает расти вдоль канала при $V_{\rm G} = 2$ В и выше.

Библиографические ссылки

- 1. De Salvo B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation. London: Wiley-ISTE Ltd, 2009.
- Bude J. D. Monte Carlo simulation of the CHISEL flash memory cell / J. D. Bude, M. R. Pinto, Smith R. Kent // IEEE Trans. Electron. Devices. 2000. Vol. 47, No 10. P. 1873–1881.
- 3. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. / В. М. Борздов [и др.]. Минск: БГУ, 2007.
- 4. *Жевняк О. Г.* Моделирование паразитных туннельных токов в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисоров // Eurasian union of Scientists (ЕСУ). 2020. № 76, Ч. 2. С. 26–28.
- 5. Моделирование электрофизических параметров элементов флеш-памяти методом Монте-Карло / О. Г. Жевняк [и др.] // Приборы и методы измерений. 2022. Т. 13, № 4. С. 276–280.

Квантовая электроника: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конференции, Минск, 21–23 ноября 2023 г.