

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование режима с температурой оплавления 185 °С и длительностью выдержки 10 мин при уровне вакуума 10^{-2} мбар приводит к достижению сферической формы и оплавлению шарикового вывода на ограничивающем слое.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Fröjd, A. Fabrication of indium bumps: Development of the process / A. Fröjd // Mid Sweden University, Department of Information Technology and Media (ITM). – 2010. – 250 p.
2. Development of an Indium bump bond process for silicon pixel detectors at PSI / С.в Broennimann [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2006. – P.303–308.
3. Получение электрического контакта к слою алюминия металлизацией формируемой методом взрывной фотолитографии / А. Е. Жамойть [и др.] // Приборостроение – 2023 : материалы 16-й Междунар. Научно-технической конференции, Минск, 15 – 17 ноября 2023 г. / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – БНТУ, 2023. – С. 224–225.
4. Видрицкий, А.Э. Сборка фотоприемных устройств методом flip-chip / А.Э. Видрицкий, В.Л. Ланин // Журн. техн. в эл. промышленности. – 2022. – Т.3, №135. – С. 66–68.
5. Кинематическая вязкость жидких высокоэнтропийных сплавов Cu–Sn–In–Bi–Pb / О.А. Чикова [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – Спецвыпуск. – С. 57–60.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ПЛАВАЮЩЕГО ЗАТВОРА НА ВЕЛИЧИНУ ПАРАЗИТНОГО ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

О. Г. Жевняк

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru*

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 уровня легирования плавающего затвора и показано, что эти зависимости имеют слабо выраженный U-образный вид.

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

SIMULATION OF DOPING OF FLOATING GATE ON A VALUE OF PARASITIC TUNNEL CURRENT IN FLASH MEMORY CELLS

O. G. Zhevnyak

*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: O. G. Zhevnyak (zhevnyakog@mail.ru)*

In present work the dependencies of relative value of parasitic tunnel current in short channel MOSFETs with floating gate are calculated by using Monte Carlo simulation. This

transistor is a base of contemporary flash memory cells. 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; tunnel current; MOS-transistor; Monte Carlo method.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня развитие флеш-технологий направлено на уменьшение размеров элементов флеш-памяти, в основе которых лежат короткоканальные кремниевые МОП-транзисторы с плавающим затвором [1]. Однако, уменьшая толщины изолирующих слоёв и длины проводящих каналов в такого рода структурах, недопустимо повышать в них значения паразитных туннельных токов, так как это приведет к искажению хранящейся в этих элементах памяти информации (см., например, [2]). Одним из направлений борьбы с повышением величины паразитных туннельных токов является разработка структуры плавающего затвора. Целью настоящего исследования явилось моделирование с помощью метода Монте-Карло влияния типа проводимости плавающего затвора на величину паразитного туннельного тока в короткоканальных МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом флеш-памяти.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе нами исследовались элементы 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 $N_D = 10^{26}$ 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} м⁻³, собственного кремния с концентрацией электронов 10^{16} м⁻³ и кремния *n*-типа с концентрацией электронов 10^{24} м⁻³.

Паразитный туннельный ток образуют электроны, находящиеся в проводящем канале у границы раздела Si/SiO₂ и туннелирующие на плавающий затвор через туннельный оксид. На рис. 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 нём и тем больше разница уровней между плавающим затвором и проводящим каналом ΔU . Для плавающего затвора *p*-типа она минимальна (ΔU_p), для плавающего затвора *n*-типа она максимальна (ΔU_n). Очевидно, что увеличение ΔU способствует усилению интенсивности паразитного туннелирования.

Однако, процесс туннелирования возникает в результате подачи рабочего напряжения на сток, которое, во-первых, значительно понижает уровень дна зоны проводимости в проводящем канале, в результате чего величина ΔU не просто уменьшается, а может даже стать отрицательной (уровень канала опустится ниже уровня плавающего затвора), а, во-вторых, разогревает электроны и повышает их энергию. Первое явление уменьшает величину паразитного туннельного тока, тогда как второе – его увеличивает.

В настоящей работе с помощью кинетического моделирования методом Монте-Карло электронного переноса в проводящем канале элемента флеш-памяти моделировалось изменение вдоль канала величин ΔU , энергии электронов E , их концентрации и дрейфовой скорости. С помощью расчета зависимостей данных величин вдоль проводящего канала от истока к стоку было промоделировано изменение величины паразитного туннельного тока вдоль этого канала. Процедуры кинетического моделирования методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона приведены в нашей работе с соавторами [3]. Процедуры моделирования непосредственно процесса туннелирования на плавающий затвор описаны в нашей работе [4].

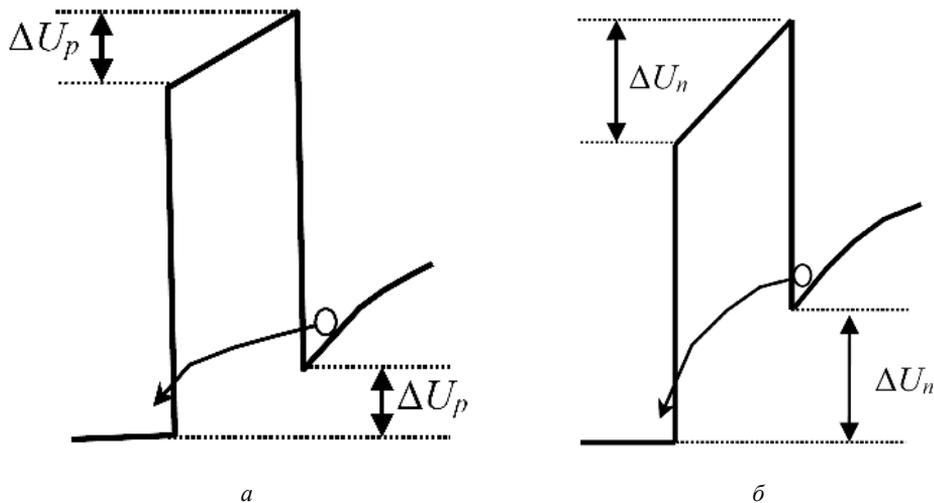


Рис. 1. Энергетическая диаграмма потенциального барьера на границе Si/SiO₂ в отсутствии напряжения на стоке: а – для затвора p-Si; б – для затвора n-Si

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 и 3 приведены некоторые из полученных нами результатов численного моделирования.

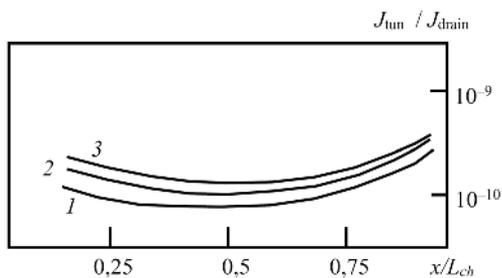


Рис. 2. Изменения вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти относительной величины паразитного туннельного тока на плавающий затвор, сформированный из кремния p -типа (1), собственного кремния (2) и кремния n -типа (3)

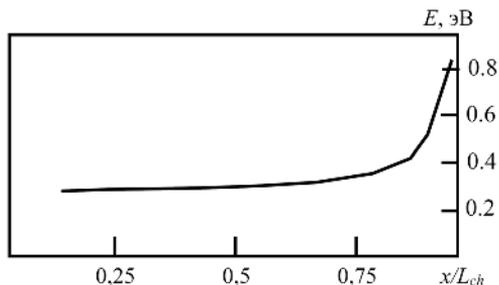


Рис. 3. Изменение вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти значения средней энергии электронов

На рис. 2 приведены зависимости от координаты вдоль проводящего канала (в направлении от истока к стоку рассматриваемых кремниевых МОП-транзисторов) отношения величин паразитного туннельного тока и тока стока, полученные для плавающих затворов трех разных типов (p -типа, n -типа и нелегированного кремния). На рис. 3 для сравнения и анализа приведена аналогичная зависимость значения средней энергии электронов в проводящем канале рассматриваемого элемента флеш-памяти. Тип проводимости плавающего затвора никак не влияет на данную зависимость.

Анализ поведения кривых, особенно на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, наименьшая величина паразитного туннельного тока наблюдается для плавающих затворов p -типа, которые соответствуют типу проводимости подложки МОП-транзистора. Для плавающих затворов из собственного кремния она, в среднем, увеличивается в полтора раза, а для затворов n -типа – в два раза, по сравнению с затворами p -типа. Во-вторых, наблюдается слабо выраженная, но заметная U-образная зависимость относительной величины паразитного туннельного тока вдоль канала, когда на начальном участке канала величина тока уменьшается, а на конечном – увеличивается. Это обусловлено тем, что, как видно из рис. 3, величина энергии электронов на начальном участке канала не меняется, тогда как из-за падения напряжения стока в канале величина сдвига уровней ΔU уменьшается, что ведет к уменьшению интенсивности паразитного туннелирования (коэффициента туннелирования для туннелирующих электронов). Во второй половине канала энергия электронов начинает заметно увеличиваться, что приводит к сильному увеличению интенсивности паразитного туннелирования (росту коэффициента туннелирования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Изучено влияние на величину паразитного туннельного тока 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Hu, C. (ed.) Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications / C. Hu. – Piscataway, NJ: IEEE Press, 1991. – 167 pp.
2. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 pp.
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 паразитных туннельных токов в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов / О. Г. Жевняк // Eurasian union of Scientists (ESU). – 2020. – № 76, Ч. 2. – С. 26–28.