

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ РАССЕЙЯНИЯ НА ФОНОНАХ И ИОНАХ ПРИМЕСИ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Жевняк О.Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На основе метода Монте-Карло проведено моделирование электронного переноса в элементах флеш-памяти на основе МОП-транзисторов с плавающим затвором с учетом и без учета рассеяния на фононах и ионах примеси. Полученные результаты показывают, что в этих структурах на подвижность электронов наиболее существенное влияние оказывают фононные механизмы рассеяния.

Ключевые слова: элемент флеш-памяти, МОП-транзистор с плавающим затвором, подвижность электронов, метод Монте-Карло.

MONTE CARLO SIMULATION OF EFFECT OF PHONON'S AND ION'S SCATTERINGS ON ELECTRON MOBILITY IN FLASH MEMORY ELEMENTS

Zhevnyak O.

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Electron transport in silicon flash memory elements based on MOSFETs with floating gate is simulated by Monte Carlo method with including of phonon's and ion's scatterings and without it. Obtained results show to the phonon scattering mechanisms produce the most significant effect on electron mobility in simulated structures.

Key words: flash memory cell, MOS-transistor with floating gate, electron mobility, Monte Carlo simulation.

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

Введение. Надежная работа современных элементов флеш-памяти, созданных на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов с плавающим затвором, во многом обусловлена деградацией подвижности электронов в режиме считывания информации [1, 2]. Эта деградация вызывается разогревом электронов при их дрейфе в проводящем канале МОП-транзисторов и определяется механизмами рассеяния электронов.

Цель настоящей работы заключалась в моделировании влияния рассеяний электронов на фононах и ионах примеси на подвижность электронов в проводящем канале элементов флеш-памяти в режиме считывания информации.

Приборная структура. На рис. 1 приведена структурная схема моделируемого транзистора.

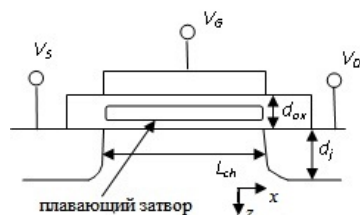


Рисунок 1 – Структурная схема моделируемого элемента флеш-памяти на основе МОП-транзистора с плавающим затвором

Рассматривался прибор со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного окисла $d_{ox} = 6$ нм, толщина туннельного окисла $d_{tun} = 2$ нм, толщина плавающего затвора

$d_{float} = 2$ нм, концентрация донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26}$ м⁻³, концентрация акцепторной примеси в подложке $N_A = 10^{24}$ м⁻³, глубина залегания истоковой и стоковой областей в подложку $d_j = 100$ нм. Значения напряжения на затворе V_G и на стоке V_D равнялись 2 В (стандартные значения для режима считывания информации).

Используемая модель. Влияние рассеяния на фононах и ионах примеси в рассматриваемых элементах флеш-памяти изучалось с помощью численного моделирования электронного переноса в них методом Монте-Карло. Алгоритмы и самосогласованные процедуры данного моделирования аналогичны тем, что приведены в наших работах [3, 4].

В результате моделирования рассчитывались средние значения электронной концентрации N_e , энергии E_{av} и подвижности μ в зависимости от координат вдоль проводящего канала (по x) и в глубину подложки (по z). Процедура самосогласования заключалась в том, что значения $N_e(x, z)$ на каждом ее этапе использовались для решения уравнения Пуассона и расчета напряженностей электрического поля в различных участках проводящего канала, а также для вычисления интенсивности рассеяния на ионах примеси. Учитывались рассеяния на низкотемпературных акустических фононах, на высокоэнергетических фононах, приводящих к междолинным переходам, а также участвующих в актах ударной ионизации и на ионах примеси.

Интенсивности соответствующих механизмов рассеяния рассчитывались с помощью следующих соотношений.

На акустическом фоне:

$$W_{ac} = \frac{D_{ac}^2 \sqrt{m^*} k_B T}{\pi \hbar^4 u_l^2 \rho} \sqrt{E(1 + \alpha E)(1 + 2\alpha E)}, \quad (1)$$

где $D_{ac} = 2 \cdot 10^{-18}$ – деформационный потенциал при рассеянии на акустических фонах; m^* – эффективная масса электронов для соответствующей долины; $u_l = 6000$ м/с – продольная скорость звука в кремнии; $\rho = 2650$ кг/м³ – плотность кремния; $\alpha = 3,1 \cdot 10^{18}$ – коэффициент непараболичности.

На междолинном фоне:

$$W_{ij} = \frac{D_{ij}^2 \sqrt{m^*} Z_{ij}}{\sqrt{2\pi} \rho \hbar^3 \omega_{ij}} \left(\frac{N_{ij}}{N_{ij} + 1} \right) \sqrt{E \pm \hbar \omega_{ij} - \Delta E_{ij}} \times \\ \times \left(1 + 2\alpha(E \pm \hbar \omega_{ij} - \Delta E_{ij}) \right), \quad (2)$$

где $D_{ij} = 10^{-8}$, Z_{ij} – число конечных долин при переходе; ω_{ij} и N_{ij} – частота и Бозе-Эйнштейна число фононов, приводящих к переходу; ΔE_{ij} – энергетический зазор между минимумами энергии рассматриваемых долин (переходы между одноосными долинами в кремнии $Z_{ij}=1$, $\Delta E_{ij}=0$, $T_{ij}=537$ К и между неодносными долинами $Z_{ij}=4$, $\Delta E_{ij}=0$, $T_{ij}=686$ К и $T_{ij}=733$ К).

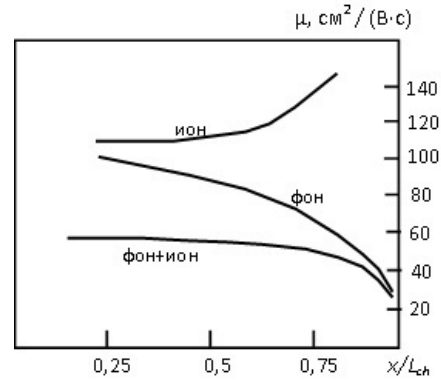
На ионах примеси:

$$[W_I]_t = \frac{N_A^t \sqrt{2} e^4}{(\epsilon_0 \epsilon_{si})^2 4\pi \sqrt{m^*} B_t^2} \frac{\sqrt{E_\alpha(1+2\alpha E)}}{1+4\left(\frac{E_\alpha}{B_t}\right)}. \quad (3)$$

Здесь N_A^t – значение концентрации акцепторной примеси для t -го участка канала, $E_\alpha = E(1 + \alpha E)$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, $\epsilon_{si} = 12$, $L_D^t = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} \epsilon_0 E_{av}^t}{N_e^t e^2}}$ – длина экранирования Дебая для электронов с характерными значениями электронной концентрации N_e^t и средней энергии электронов E_{av}^t , $B_t = \hbar^2 / (2(L_D^t)^2 m^*)$, $E_b^t = \sqrt[3]{0,75 / \pi N_A^t}$.

Результаты моделирования и их обсуждение. На рис. 2 приведены полученные зависимости средних значений подвижности электронов вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти с учетом всех рассматриваемых механизмов рассеяния и отдельно с учетом

только фононных механизмов или на ионах примеси.



Фон+ион – учитываются оба механизма рассеяния, фон – учет только фононного рассеяния, ион – учет только рассеяния на ионах примеси

Рисунок 2 – Зависимости вдоль проводящего канала средней подвижности электронов

Как можно видеть, фононные механизмы рассеяния оказывают основное влияние на величину подвижности электронов, а на участке проводящего канала вблизи стока это влияние следует признать подавляющим.

Заключение. Таким образом, результаты моделирования показывают, что в современных элементах флеш-памяти деградация подвижности электронов обусловлена их рассеянием на фонах.

Литература

1. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd, 2009. – 256 p
2. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm: Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna [et al.] // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, № 6. – P.941–951.
3. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.]. – 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. – Том. 1, № 12. – С. 58–61.