УДК 621.382

<u>Жевняк О. Г.</u>, Борздов А. В., Борздов В. М.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТОКОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ФОРМУ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА В ЭЛЕМЕНТАХ ФЛЕШ-ПАМЯТИ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Представлены результаты моделирования процессов переноса электронов в короткоканальном кремниевом МОП-транзисторе с плавающим затвором, являющимся базовым элементом флеш-памяти. Изучено влияние напряжения на стоке на форму потенциального барьера туннельного оксида, определяющего уровень паразитного туннельного тока в такого рода элементах. Рассчитаны зависимости отношения паразитного туннельного тока к току стока от координаты вдоль проводящего канала транзистора.

Дальнейший прогресс в проектировании и производстве микросхем флеш-памяти приводит к значительному уменьшению областей протекания электрического тока в кремниевых МОП-транзисторах с плавающим затвором, являющихся базовым элементом данных микросхем [1]. Это сопровождается резким возрастанием величин паразитных токов утечки, которые в конечном счете могут привести к искажению хранящейся в элементах флеш-памяти информации (см., например, [2, 3]). Очевидно, что при разработке перспективных устройств на основе флеш-технологий необходимо не допускать условий для возникновения высоких уровней паразитных токов.

На рисунке 1 приведена энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти в режиме отсутствия заряда на плавающем затворе при подаче рабочего напряжения V_G на затвор короткоканального МОП-транзистора и отсутствии напряжения на стоке ($V_D = 0$). В этом случае в *p*-подложке данного транзистора возникнет инверсионный слой (проводящий канал) вследствие появления падения напряжения V_{Si} ($V_{Si} + V_{TVH} \approx 0.5 V_G$).



Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти при $+V_G$ и $V_D = 0$

На рисунке 2 приведена энергетическая диаграмма того же элемента, возникающая в режиме считывания, хранящегося на элементе флеш-памяти бита информации. Данный режим включается при подаче на затвор и на сток МОП-транзистора рабочих напряжений V_G и V_D , соответственно. В этом случае в проводящем канала потечет электрический ток, уровень которого укажет на соответствующее значение бита информации, хранящегося на плавающем затворе.



Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма элемента флеш-памяти при +V_G и +V_D

Паразитный туннельный ток возникает из инверсионного слоя в *p*-Si через туннельный оксид на плавающий затвор. На величину этого тока ключевое влияние оказывают четыре фактора: 1) толщина туннельного оксида $d_{\text{тун}}$, 2) величина падения напряжения в туннельном оксиде $V_{\text{тун}}$, 3) величина сдвига зон в плавающем затворе и *p*-Si МОП-транзистора ΔV , 4) значение энергии *E* туннелирующих электронов в *p*-Si вблизи туннельного оксида.

Наиболее сильное влияние на паразитный туннельный ток электронов на плавающий затвор оказывает толщина туннельного оксида $d_{\text{тун}}$. Однако, так как она задаётся конструктивно, и в процессе эксплуатации не меняется, в настоящем докладе влияние $d_{\text{тун}}$ на паразитный туннельный ток мы не рассматриваем. Нас интересует влияние напряжения на стоке, без которого чтение информации на элементе флеш-памяти невозможно. Данное напряжение, как видно из сравнения рисунок 1 и 2, заметно изменяет значения величин $V_{\text{тун}}$ и ΔV , в том числе, чаще всего, изменяя и их знак, т. е. направление среза вершины потенциального барьера туннельного оксида (знак $V_{\text{тун}}$) и расположение дна зоны проводимости в подложке транзистора по отношению к дну зоны проводимости на плавающем затворе (знак ΔV — положительное значение соответствует более высокому положению дна зоны проводимости подложки). Также напряжение на стоке способствует разогреву электронов в проводящем канале короткоканального МОП-транзистора при их дрейфе от истока к стоку, т. е. оказывает непосредственное влияние и на энергию электронов Е. При этом вся сложность и неоднозначность влияния V_D заключается в том, что все эти три величины – $V_{\text{тун}}$, ΔV и E – под действием напряжения, подаваемого на сток, изменяются с изменением координаты х вдоль проводящего канала в направлении от истока к стоку. Увеличение V_{тун} (независимо от его знака, т. е. более крутая форма вершины потенциального барьера туннельного оксида) приводит к росту паразитного туннельного тока, точно также, как и увеличение энергии электронов *E*. Уменьшение ΔV , особенно переход этой величины в область отрицательных значений (т. е. сильное понижение дна зоны проводимости в подложке), приводит к уменьшению паразитного туннельного тока. Следовательно, вдоль проводящего канала МОПтранзистора с плавающим затвором величина паразитного тока будет сложным образом изменяться. Очевидно, что при моделировании паразитного туннельного тока и вычислении его значений в элементах флеш-памяти необходимо точно рассчитывать зависимости $V_{\text{тун}}(x)$, $\Delta V(x)$ и E(x) для конкретно подаваемых на затвор и сток МОП-транзистора напряжений V_G и V_D.

В настоящей работе нами осуществлено моделирование изменения формы потенциального барьера туннельного оксида (т. е. рассчитаны $V_{\text{тун}}(x)$, $\Delta V(x)$ и E(x)), а также рассчитаны зависимости величины паразитного туннельного тока вдоль проводящего канала для МОПтранзистора с плавающим затвором со следующими конструктивно-технологическими параметрами: длина канала $L_{ch} = 0,2$ мкм, толщина подзатворного оксида $d_{\text{окс}} = 7$ нм, толщина туннельного оксида $d_{\text{тун}} = 2$ нм, толщина плавающего затвора $d_{\text{плав}} = 2$ нм, концентрации донорной примеси в областях истока и стока $N_D = 10^{26}$ м⁻³ и акцепторной в подложке $N_A = 10^{24}$ м⁻³. Алгоритмы и процедуры моделирования паразитного туннельного тока в рассматриваемых условиях, которые базируются на численном моделировании электронного переноса в канале МОП-транзистора методом Монте-Карло вместе с самосогласованным решением уравнения Пуассона, описаны в наших работах [4; 5]. Самосогласованное решение уравнения Пуассона позволяет точно рассчитать изменения вдоль канала значений $V_{\text{тун}}$ и ΔV , а численное моделирование процесса переноса электронов в канале транзистора позволяет рассчитать зависимости средней энергии электронов от координаты *х* вдоль канала.

На рисунках 3 и 4 приведены две из рассчитанных нами зависимостей вдоль проводящего канала МОП-транзистора с плавающим затвором — величины отклонения зоны проводимости подложки транзистора от дна зоны проводимости плавающего затвора ΔV и отношения плотности туннельного паразитного тока к плотности тока стока $J_{\text{тун}} / J_{\text{сток}}$. Полученные зависимости показывают, что величина ΔV приблизительно в середине проводящего канала меняет свой знак и вблизи стока приближается к значению, составляющему около – 0.7 V_D. Результаты расчета величины паразитного туннельного тока показывают, что в целом для рассматриваемых условий его значения крайне малы и медленно растут вдоль проводящего канала.







Рисунок 4 – Отношение плотности туннельного паразитного тока к плотности тока стока вдоль проводящего канала моделируемого элемента флеш-памяти при $V_G = 2$ В и $V_D = 2$ В.

Таким образом, в настоящей работе путем численного моделирования процессов переноса электронов в проводящем канале короткоканального кремниевого МОП-транзистора с плавающим затвором рассчитана форма потенциального барьера туннельного оксида и изучено влияние на нее стокового напряжения. Определено изменение уровня дна зоны проводимости подложки МОП-транзистора под действием стокового напряжения вдоль проводящего канала и получена зависимость вдоль данного канала отношения плотности туннельного паразитного тока к току стока для рабочих напряжений на затворе и стоке, равнявшимся 2 В.

Список литературы

1. Nonvolatile semiconductor memories: Technologies, design, and applications / Hu C. (ed.). – Piscataway, NJ: IEEE Press. – 1991. – 167 p.

2. De Salvo, B. Silicon Non-Volatile Memories: paths of innovation / B. De Salvo. – London: Wiley-ISTE Ltd. – 2009. – 256 p.

3. Ghetti, A. Low-voltage hot electrons and soft programming lifetime prediction in nonvolatile memory cells / A. Ghetti, L. Selmi, and R. Bez // IEEE Trans. Electron Devices. – 1999. – Vol. 46, No. 4. – P. 696–702.

4. Жевняк, О. Г. Моделирование электрофизических параметров элементов флешпамяти методом Монте-Карло / О. Г. Жевняк, В. М. Борздов, А. В., Борздов, А. Н. Петлицкий // Приборы и методы измерений. – 2022. – Том. 13, № 4. – С. 208–212.

5. 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.