

МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.382

**ВЛИЯНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ
РАЗЛИЧНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ МОП-СТРУКТУР —
ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**Ф.П. КОРШУНОВ¹, Ю.В. БОГАТЫРЕВ¹, А.И. БЕЛОУС²,
С.В. ШВЕДОВ², С.Б. ЛАСТОВСКИЙ¹, В.И. КУЛЬГАЧЕВ¹¹*Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси
П. Бровка, 19, Минск, 220072, Беларусь,*²*НТЦ "Белмикросистемы" УП "Завод полупроводниковых приборов" НПО "Интеграл"
пл. Казинца, 1, Минск, 220108, Беларусь**Поступила в редакцию 15 января 2006*

Рассмотрено влияние гамма-излучения на параметры тестовых *n*-канальных транзисторных МОП-структур — элементов логических комплементарных МОП интегральных микросхем, а также МОП микросхем памяти — электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств. Получены сходные экспериментальные результаты по деградации параметров запоминающих элементов как при воздействии гамма-излучения, так и при воздействии циклов перезаписи информации, что позволяет использовать данные радиационных исследований запоминающих элементов для моделирования результатов их испытаний на надежность.

Ключевые слова: транзисторные МОП-структуры, элементы интегральных микросхем, электрически стираемые программируемые постоянные запоминающие устройства, гамма-излучение.

Введение

Обеспечение работоспособности интегральных микросхем в условиях воздействия ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения становится все более актуальной проблемой вследствие расширения области применения микроэлектронной техники в промышленных, военных и космических объектах.

Высокие эксплуатационные характеристики и большие функциональные возможности обуславливают широкое использование приборов на основе структур металл–оксид–полупроводник (МОП) в различных областях науки и техники в условиях воздействия ионизирующих излучений [1–3].

МОП-транзисторы обладают высоким входным сопротивлением, температурной стабильностью параметров, экономичностью, относительной простотой технологии. Это способствует их широкому применению в качестве основных элементов интегральных микросхем (ИМС). Наибольшее применение в различной радиоэлектронной аппаратуре получили ИМС на комплементарных *n*- и *p*-канальных МОП-транзисторах (КМОП ИМС), что обусловлено их низким энергопотреблением, повышенной помехоустойчивостью, относительно высоким быстродействием и достаточно большой нагрузочной способностью [4].

Приборы со встроенными блоками энергонезависимой памяти в настоящее время являются одним из наиболее используемых типов микросхем [5]. Эти приборы применяются в различных качествах — микросхемы для компьютерной техники и калькуляторов, электронных часов и оборудования для телефонии, средств связи и т.д. Включение в состав микроконтроллеров блоков энергонезависимой памяти расширяет возможности этого класса микросхем. Блоки энергонезависимой памяти могут выполнять функции электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств (ЭСПЗУ или EEPROM — Electrically Erasable Programmable Read Only Memory). Запоминающие элементы ЭСПЗУ хранят информацию при отключенном напряжении питания. Обычно она представляется зарядом в диэлектрике или на специальном плавающем затворе МОП-транзистора. ЭСПЗУ разделены на два класса приборов: с параллельным стиранием (FLASH EEPROM) и полнофункциональные ЭСПЗУ (FLOTOX EEPROM). Здесь термин "FLASH" используется как характеристика высокой скорости стирания: "in a flash" — в мгновение ока. Термин "FLOTOX" означает "Floating Gate Tunnel Oxide" — "плавающий затвор с туннелированием в окисле". В полнофункциональных ЭСПЗУ возможно стирание каждой ячейки в отдельности, а операция стирания FLASH памяти может выполняться только для больших секторов или для всего массива ячеек одновременно. Такое различие обусловлено использованием для полнофункциональных ЭСПЗУ базовых двухтранзисторных запоминающих ячеек, а для FLASH памяти — одностранзисторных ячеек.

В работе представлены результаты исследований тестовых *n*-канальных транзисторных МОП-структур: элементов логических комплементарных МОП интегральных микросхем (КМОП ИМС), а также МОП микросхем памяти — электрически стираемых программируемых постоянных запоминающих устройств при воздействии гамма-излучения Co^{60} .

Методика

Эксперименты проводились на тестовых транзисторных МОП-структурах с индуцированными каналами *n*-типа (элементах логических КМОП ИМС), у которых толщина подзатворного окисла кремния составляла 20–25 нм, использовался поликремниевый затвор. Данные структуры были изготовлены по стандартной эпитаксиально-планарной технологии.

Вторым видом объектов исследования в данной работе являлись изготовленные по типовому технологическому маршруту для микроконтроллеров со встроенными блоками ЭСПЗУ запоминающие ячейки двух типов. Первый тип — одностранзисторная ячейка памяти с параллельным стиранием (FLASH EEPROM), которая состоит из запоминающего элемента — *n*-канального МОП-транзистора с плавающим затвором. Ячейка ЭСПЗУ сформирована в подложке *p*-типа. Плавающий затвор отделен от подложки слоем подзатворного окисла. В области стока имеется окно тонкого туннельного окисла (инжектор) толщиной 8–10 нм. Плавающий затвор отделен от управляющего затвора межслойным диэлектриком. Второй тип — двухтранзисторная ячейка памяти полнофункционального ЭСПЗУ (FLOTOX EEPROM), которая состоит из двух *n*-канальных МОП-транзисторов: транзистора выборки (адресного транзистора) и запоминающего транзистора с плавающим затвором. Технология изготовления ячеек памяти второго типа в основном такая же, как и ячеек первого типа.

Облучение тестовых образцов гамма-квантами Co^{60} проводилось на установке "Исследователь" при температуре 300–310 К и различных электрических режимах. Мощность дозы гамма-излучения составляла 0,5 Гр/с, доза — 10^3 – 10^5 Гр.

До и после облучения измеряли вольтамперные характеристики, пороговые напряжения U_T (при токе стока $I_d=0,1$ мкА) МОП-транзисторов с помощью стандартного измерителя Л2-56.

Программирование запоминающей ячейки осуществляется туннелированием электронов из области стока транзистора на плавающий затвор через туннельный окисел под воздействием приложенного к управляющему затвору высокого напряжения при заземлении стока. Стирание запоминающей ячейки происходит обратным туннелированием электронов с плавающего затвора на сток под воздействием приложенного к стоку высокого напряжения (управляющий затвор заземлен). Исследования проводились для напряжения программирования (стирания) 15 В, длительность импульса напряжения составляла 1 мс.

Контролировалось пороговое напряжение U_T каждого запоминающего элемента ЭСПЗУ после программирования (стирания).

Экспериментальная часть

1. Транзисторные МОП-структуры — элементы КМОП ИМС

На рис. 1 представлены дозовые зависимости изменений порогового напряжения ΔU_T n -канальных транзисторных МОП-структур при различных электрических режимах. В результате облучения величина ΔU_T оказалась максимальной в пассивном режиме при дозе $D=5 \cdot 10^4 - 10^5$ Гр, а в активном режиме (при напряжении на затворе $U_g=5$ В) наибольшее изменение порогового напряжения достигается при $D=2 \cdot 10^4$ Гр, однако при этом ΔU_T в несколько раз меньше, чем в первом случае.

У n -канальных МОП-транзисторов при облучении большими дозами (10^5 Гр)

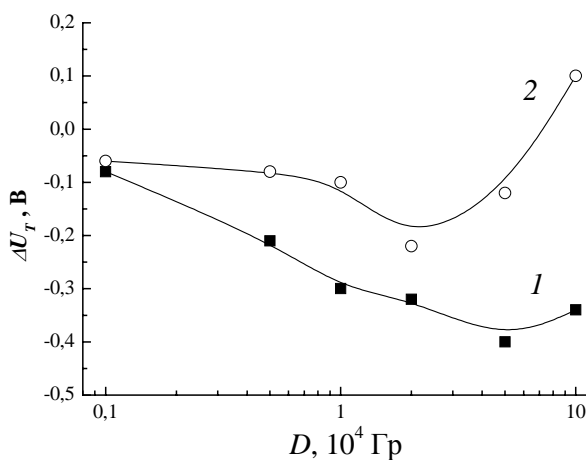


Рис. 1. Изменение порогового напряжения n -канальных транзисторных МОП-структур в зависимости от дозы гамма-излучения при различных электрических режимах: 1 — $U_g=0$ В, 2 — $+5$ В

наблюдается снижение деградации (восстановление) порогового напряжения (рис. 1) в связи с ростом плотности отрицательно заряженных поверхностных состояний, компенсирующих положительный заряд в SiO_2 [1, 2]. Эффекты максимального изменения параметров транзисторных МОП-структур при облучении в пассивном электрическом режиме, по сравнению с облучением при наличии напряжения смещения, можно объяснить дополнительной компенсацией положительного накопленного заряда в окисле отрицательным зарядом электронов, захваченных на ловушках в приграничных областях SiO_2 в активном электрическом режиме [6]. Образование отрицательного заряда в SiO_2 в основном обусловлено наличием несвязанного кислорода, действующего как акцепторный или амфотерный центр [7].

В процессе облучения происходит как накопление, так и релаксация положительного заряда дырок, захваченных на ловушки в SiO_2 , за счет туннелирования электронов из полупроводника или затвора на эти ловушки [1]. В нашем случае достаточно тонкого диэлектрика ($d=20-25$ нм) при облучении с приложенным напряжением (5 В) в окисле создается электрическое поле $\sim 5 \cdot 10^6$ В/см. При этом длина прямого туннелирования электронов достигает 5 нм, а если учитывать туннельные переходы электронов с ловушки на ловушку, то область перезарядки в SiO_2 возрастает до 10 нм [8]. Поэтому практически большая часть положительного заряда, обычно расположенного в окисле на расстоянии 5 ± 2 нм от границы раздела [1, 8], будет нейтрализована при наличии смещения затвора. Следовательно, при облучении в пассивном электрическом режиме процессы туннелирования электронов при малых дозах не проявляются, поскольку первоначально имеется только небольшое внутреннее электрическое поле в SiO_2 , обусловленное контактной разностью потенциалов. При больших дозах облучения эффекты туннелирования электронов дополнительно стимулируются внутренним полем захваченного положительного заряда в окисле кремния.

2. Ячейки памяти ЭСППЗУ

На рис. 2 показаны дозовые зависимости изменения порогового напряжения (в состоянии программирования) запоминающих элементов ЭСППЗУ с параллельным стиранием (FLASH EEPROM) при облучении в пассивном электрическом режиме. В процессе облучения наблюдается экспоненциальное снижение порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов, что обусловлено накоплением положительного заряда в подзатворном окисле [1, 2]. При дозах $(4-5) \cdot 10^3$ Гр практически достигается насыщение зависимостей $\Delta U_T(D)$.

У запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) с различными топологическими размерами наблюдаются некоторые отличия в изменениях порогового напряжения при облучении. Наименьшая деградация порогового напряжения происходит у структур с минимальной площадью плавающего затвора: $S_F=3,1 \times 2,6$ мкм² (рис. 2).

С использованием регрессионного анализа [9] проводился расчет дозовых зависимостей изменений порогового напряжения запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) при облучении. Была получена относительно несложная экспоненциальная зависимость $\Delta U_T(D)$:

$$\Delta U_T = y_0 + A[1 - \exp(-D/t)].$$

Здесь y_0 , A , t — постоянные коэффициенты.

Например, для тестовых структур ячеек памяти с площадью плавающего затвора $S_F=3,1 \times 3,6$ мкм² были определены следующие значения постоянных коэффициентов: $y_0=0,364$; $A=5,736$; $t=8,702$.

Полученные аналитические дозовые зависимости могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости запоминающих элементов ЭСППЗУ типа FLASH EEPROM.

Один цикл перепрограммирования ЭСППЗУ состоит из операций записи (соответствует высокому пороговому напряжению транзистора с плавающим затвором) и стирания (соответствует низкому значению порогового напряжения). Разница между значениями порогового напряжения запоминающей ячейки в записанном и стертом состояниях называется "окном программирования".

На рис. 3 показаны дозовые зависимости порогового напряжения (в состояниях программирования и стирания) запоминающих элементов полнофункционального ЭСППЗУ (FLOTOX EEPROM) при облучении в пассивном электрическом режиме. Видно, что с ростом дозы облучения происходит уменьшение абсолютных значений высокого и низкого порогового напряжения, т. е. сужение "окна программирования".

Аналогичные результаты были получены на таких же образцах элементов памяти ЭСППЗУ (FLOTOX) при исследовании воздействия циклов перезаписи информации на параметры запоминающей ячейки. Эксперименты показали, что в течение первых циклов перезаписи "окно программирования" немного расширяется, а затем начинает сужаться с увеличением количества циклов.

Параметры запоминающих ячеек (пороговые напряжения в записанном и стертом состояниях) контролировались после 10^M , $2 \cdot 10^M$, $5 \cdot 10^M$ циклов для M от 0 до 5. Приведенные ниже зависимости пороговых напряжений запоминающей ячейки ЭСППЗУ от количества

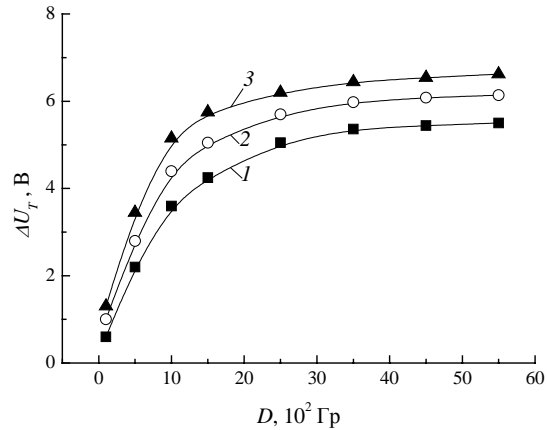


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLASH) с различной площадью плавающего затвора S_F при гамма-облучении: 1 — $S_F=3,1 \times 2,6$ мкм²; 2 — $S_F=3,1 \times 3,6$ мкм²; 3 — $S_F=3,1 \times 6,0$ мкм²

циклов перепрограммирования информации N построены для средних значений измеряемых параметров (рис. 4).

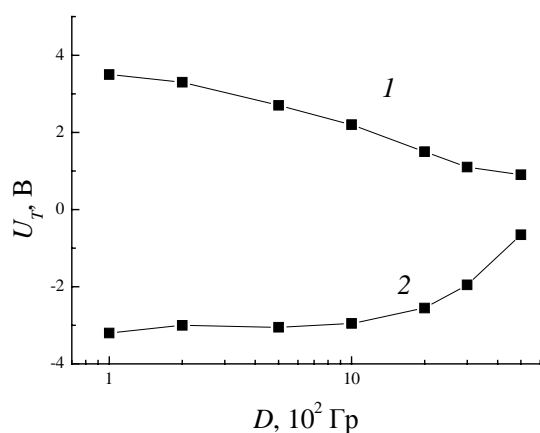


Рис. 3. Дозовые зависимости порогового напряжения (в состояниях программирования — 1 и стирания — 2) запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) при гамма-облучении

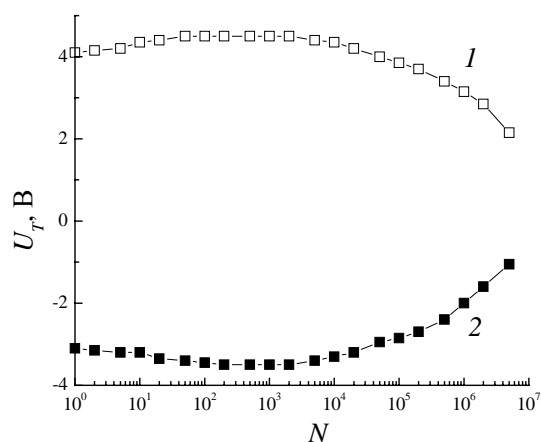


Рис. 4. Зависимости пороговых напряжений запоминающей ячейки ЭСППЗУ (FLOTOX) от количества циклов перепрограммирования: 1 — состояние программирования; 2 — состояние стирания

Во время первой тысячи циклов "окно программирования" несколько увеличивается. Этот эффект связан с появлением положительного заряда на границе раздела кремний–туннельный оксид [10]. Положительный заряд возникает вследствие туннелирования дырок из кремния на границу раздела с оксидом или электронов в противоположном направлении. Накопленный на границе раздела положительный заряд понижает потенциальный барьер и соответственно увеличивает туннельный ток Фаулера–Нордгейма через туннельный оксид. После приблизительно 2000 циклов перезаписи тенденция изменяется, "окно программирования" начинает сужаться, что обусловлено накоплением отрицательного заряда в туннельном оксиде [10]. При этом уменьшается электрическое поле в оксиде и соответственно количество туннелирующих электронов, а также туннельный ток в процессе программирования (стирания) ячейки. При дальнейшем увеличении количества циклов перезаписи информации происходит исчезновение "окна программирования" и разрушение туннельного оксида.

Таким образом, запоминающие ячейки ЭСППЗУ (FLOTOX) выдерживают до $5 \cdot 10^6$ циклов перезаписи информации (рис. 4).

Следовательно, получены сходные экспериментальные результаты по деградации параметров запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) как при воздействии гамма-излучения, так и при воздействии циклов перезаписи информации.

Заключение

В результате проведенных исследований изменений параметров элементной базы КМОП ИМС и ЭСППЗУ при воздействии гамма-излучения установлено:

При больших дозах гамма-радиации (10^5 Гр) наблюдается восстановление параметров транзисторных МОП-структур (элементов логических КМОП ИМС). Кроме того, обнаружена более высокая радиационная стойкость МОП-приборов в активном электрическом режиме по сравнению с облучением в пассивном режиме.

При облучении гамма-квантами наблюдается экспоненциальное снижение порогового напряжения тестовых МОП-транзисторов (элементов FLASH ЭСППЗУ), что обусловлено накоплением положительного заряда в подзатворном оксиде. При дозах $(4 \div 5) \cdot 10^3$ Гр

практически достигается насыщение зависимостей $\Delta U_T(D)$. Получены аналитические дозовые зависимости, которые могут быть использованы для прогнозирования радиационной стойкости запоминающих элементов ЭСППЗУ типа FLASH.

Установлено, что с ростом дозы облучения происходит уменьшение абсолютных значений высокого и низкого порогового напряжения, т. е. сужение "окна программирования" запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX).

Обнаружено, что при увеличении количества циклов перезаписи более 10^5 у элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) происходит уменьшение "окна программирования" — разницы между значениями порогового напряжения запоминающей ячейки в записанном и стертом состояниях. Этот эффект объясняется накоплением отрицательного заряда в туннельном окисле запоминающей ячейки.

Полученные сходные экспериментальные результаты по деградации параметров запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) как при воздействии гамма-излучения, так и при воздействии циклов перезаписи информации позволяют использовать один из исследованных факторов для моделирования другого дестабилизирующего фактора. Следовательно, данные радиационных исследований запоминающих элементов ЭСППЗУ (FLOTOX) могут быть использованы для моделирования результатов их испытаний на надежность.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

INFLUENCE OF GAMMA-RADIATION ON PARAMETERS OF VARIOUS TRANSISTOR MOS STRUCTURES — ELEMENTS OF INTEGRATED MICROCIRCUITS

F.P. KORSHUNOV, Yu.V. BOGATYREV, A.I. BELOUS,
S.V. SHVEDOV, S.B. LASTOVSKY, V.I. KULGACHEV

Abstract

Influence of gamma-radiation on parameters of test n-channel transistor MOS structures (elements of logic complementary MOS integrated microcircuits, and also MOS memory microcircuits — Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) is considered. Similar experimental results on degradation of parameters of memory elements are received both at influence of gamma-radiation, and at influence of cycles of rewriting of the information that allows to use the data of radiation researches of memory elements for modeling results of their reliability tests.

Литература

1. *Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В.* Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М., 1988.
2. *Ma T.P., Dressendorfer P.V.* Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. New York, 1989.
3. *Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А.* Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск, 1986.
4. *Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И.* Радиационные эффекты в КМОП ИС. М., 1994.
5. *Ершова Н.Ю.* Микропроцессоры. Петрозаводск, 2002.
6. *Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И.* // Докл. НАН Беларуси. 2004. Т. 48, № 5. С. 46–50.
7. *Sah C.T.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1976. Vol. NS-23, N 6. P. 1563–1568.
8. *Ропов V.D.* // Radiation Measurements. 1996. Vol. 26. P. 497–501.
9. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М., 1973.
10. *Madrenas J., Ivorra A., Alarcon E.* // Proc. of the 41st IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. Indiana, USA, August 1998. P. 348-351.