

УДК 621.3.032: 539.16.04

РАДИАЦИОННОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ МДП-ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

© 2003 М. Н. Левин, А. В. Татаринцев, В. Р. Гитлин

Воронежский государственный университет

Представлены результаты использования рентгеновского излучения и локального облучения электронным пучком в растровом электронном микроскопе для оценки радиационной стойкости и выявления радиационно-чувствительных участков МДП-элементов БИС.

ВВЕДЕНИЕ

Ионизирующее излучение вызывает образование радиационно-индуцированного заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структуры и поверхностных состояний (ПС) на границе раздела полупроводник-диэлектрик, что ведет к деградации МДП интегральных схем вследствие изменения таких параметров, как пороговое напряжение и крутизна транзисторов. [1]. Для изучения кинетики изменения зарядового состояния границы раздела в МДП транзисторе (МДПТ) разработаны методы подпороговых токов, применимые в том числе и для транзистора с коротким каналом [2, 3, 4]. Однако, наблюдаемый эффект повышения радиационной чувствительности транзисторных МДП-структур в результате циклических радиационно-термических воздействий [5] свидетельствует о протекании необратимых процессов в объеме диэлектрической пленки, а метод подпороговых токов не позволяет проводить исследование этих процессов. Для этих целей представляет интерес использование ионизирующего излучения в качестве тестирующего воздействия.

Другую проблему представляет деградация МДП-элементов интегральных схем в результате появления радиационно-индуцированных токов утечек и пробоя, что приводит к увеличению тока потребления схемой, нарушению теплового режима и т.д. [6]. Поскольку характер деградации МДП ИС определяется конструктивно-технологическими особенностями их изготовления, то возникает задача выявления участков ИС, наиболее чувствительных к воздействию радиации. Использование для этих целей сфокусированного электронного пучка в растровом электронном мик-

роскопе (РЭМ) дает возможность воздействия на отдельные участки элементов схем с целью выявления причин деградации их параметров и имитации различных эффектов.

В настоящей работе представлены результаты использования рентгеновского излучения и облучения электронным пучком в растровом электронном микроскопе для радиационного тестирования МДП-элементов ИС.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на тестовых МДП транзисторах серийных МДП БИС с поликремниевым затвором. Использовались *n*- и *p*-канальные транзисторы разной геометрии с длиной канала $3 \div 5$ мкм, с подзатворным окислом, сформированным термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре $T = 1323$ К, толщиной $d = 45 \div 120$ нм, с концентрацией легирующей примеси в подложке $N_{SUB} = 5 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³. По периферии канала в области LOCOS (LOCAL Oxidation of Silicon) толщина окисла составляла 1 мкм. Облучение проводилось на модифицированной установке ИРИС-3М с энергией рентгеновских квантов 25 кэВ и в растровом электронном микроскопе РЭМ-200 электронами с энергией от 15 до 30 кэВ в интервале потоков $N_e = 10^{10} - 10^{16}$ см⁻² при токе электронного зонда $10^{-11} - 10^{-9}$ А. Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились на автоматизированном комплексе [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Радиационно-индуцированный токперенос в подзатворных слоях МДП транзисторов
ВАХ радиационно-индуцированного тока измерялись непосредственно в процессе об-

лучения МДПТ рентгеновским излучением предельно низкой интенсивности. Мощность дозы выбиралась таким образом, чтобы с одной стороны возбудить надежно измеряемый ток через МДП-структуру, а с другой стороны не вызвать заметного изменения зарядовых характеристик исследуемой структуры в процессе измерения ВАХ.

На рис. 1 приведены стационарные сток-затворные ВАХ n -канального МДПТ после циклического воздействия: рентгеновское облучение — термический отжиг. Облучение рентгеновскими квантами приводит к изменению зарядового состояния подзатворного окисла и границы его раздела с полупроводником. Это проявляется в изменении вида исходной ВАХ (кривая 1) после облучения (кривая 2). Наблюдается сдвиг порогового напряжения в сторону отрицательных значений, свидетельствующий о накоплении эффективного заряда в окисле, и изменяется наклон ВАХ, что говорит об увеличении заряда на поверхностных состояниях границы раздела. После термоотжига при температуре 650 К в течение 1 часа (кривая 3) заряд на ПС полностью отжигается, а в окисле остается неотжигаемая часть [5]. Существенным результатом явилось то, что было обнаружено еще

большее увеличение заряда в окисле и на ПС после повторения цикла облучение — отжиг (кривая 4). Такое повышение радиационной чувствительности МДПТ после радиационно-термических воздействий свидетельствует о необратимых изменениях, возникающих в кремниевых МДП-структурах. Однако, как отмечалось ранее, исследования радиационно-стимулированных изменений в МДП-структурах методом стационарных подпороговых токов не позволяют сделать заключения о процессах происходящих в объеме диэлектрика, поскольку на изменения подпороговых ВАХ оказывают влияние лишь изменения, касающиеся слоя окисла вблизи границы с полупроводником.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов по измерению радиационно-индуцированного тока через подзатворный диэлектрик n -канального МДП транзистора, которые проводились параллельно с вышеописанными на аналогичных образцах. Исходная ВАХ тока, индуцируемого рентгеновским излучением в МДП-структуре (кривая 1), линейна на начальном участке и переходит в сублинейную область при повышении напряжения обеих полярностей. Следует отметить, что подобный вид ВАХ, а именно, отсутствие

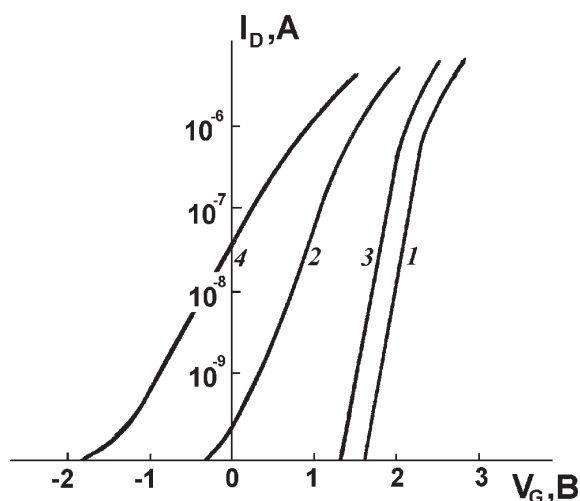


Рис. 1. Подпороговые сток-затворные ВАХ n -канального МДПТ: 1 — исходная; 2 — после облучения рентгеном энергией 25 кэВ, дозой 10^5 Р, мощность дозы излучения 0,5 Р/с; 3 — облученный транзистор после термического отжига 650 К, 1 час; 4 — после повторного облучения рентгеном дозой 10^5 Рад (Si). Толщина окисла $d = 98$ нм

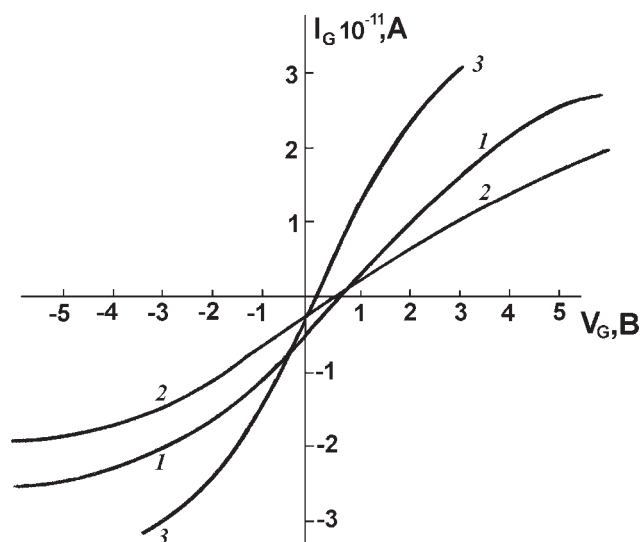


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики радиационно-индуцированного тока через подзатворный диэлектрик n -канального МДП транзистора, облучаемого рентгеновским излучением: 1 — исходная ВАХ; 2 — после облучения рентгеновскими квантами с энергией 25 кэВ, дозой 10^5 Р, мощность дозы излучения 0,5 Р/с; 3 — облученный транзистор после термического отжига 650 К, 1 час. Толщина окисла $d = 98$ нм

сверхлинейного участка при высоких напряжениях, свидетельствует об отсутствии надбарьерной эмиссии носителей из контактов, поскольку известно, что эмиссионный ток экспоненциально увеличивается с напряжением за счет снижения потенциального барьера на границе раздела электрическим полем [8].

Облучение МДПТ приводило к уменьшению наклона ВАХ радиационно-индуцированного тока (кривая 2). Однако, после термического отжига облученной структуры при температуре 650 К в течение 1 часа (или спустя несколько суток ее хранения при комнатной температуре после облучения) наблюдалось увеличение наклона ВАХ до значений, превышающих наклон ВАХ необлученной структуры (кривая 3).

Сопоставление проведенных экспериментов дает возможность связать электрофизические процессы, протекающие в системе Si-SiO₂ МДПТ со структурными преобразованиями.

Сравнение результатов, приведенных на рис. 1, 2 позволяет сделать следующие выводы. Увеличение значений накапливаемого заряда в окисле при первом и втором облучениях в одних и тех же условиях, определяемое из измерения стационарных сток-затворных ВАХ, может быть связано только с изменением концентрации центров дырочного захвата вблизи границ раздела окисного слоя в результате первого цикла радиационно-термического воздействия. Этим же фактом может быть объяснено и наблюдавшееся усиление генерации ПС при повторном облучении. Обнаруженный эффект «сверхвосстановления» линейного участка ВАХ, по-видимому, обусловлен повышением концентрации и подвижности свободных носителей, участвующих в радиационно-индуцированном токопереносе через диэлектрик. Концентрация генерируемых носителей при данной напряженности поля зависит от их времени жизни, которое определяется наличием рекомбинационных центров в запрещенной зоне окисла, а подвижность носителей зависит от наличия центров рассеяния в окисле. Таким образом, наклон ВАХ характеризует степень дефектности окисного слоя, а эффект «сверхвосстановления» ВАХ свидетельствует о повышении структурного совершенства слоя двуокиси кремния в системе Si-SiO₂, то есть уменьшения в нем количества точечных дефектов,

в результате радиационно-термического воздействия.

Таким образом, радиационно-термические воздействия способны вызвать необратимые структурные изменения в слое SiO₂ МДП транзистора. В окисном слое протекают два взаимосвязанных процесса. Вблизи границы раздела окисла с полупроводником увеличивается концентрация центров дырочного захвата, что проявляется в увеличении радиационной чувствительности МДП-структуры при повторном облучении. Одновременно с этим наблюдается уменьшение количества центров рассеяния и рекомбинации носителей в глубине окисного слоя, что проявляется в эффекте «сверхвосстановления» ВАХ радиационно-индуцированного тока.

Подобные структурные изменения могут быть объяснены в рамках известной модели «градиента напряженных связей» [6, 9, 10], согласно которой в результате воздействия ионизирующего излучения, происходит пространственное перемещение напряженных Si-O связей в поле упругих напряжений, необходимо существующих в слоях стеклообразной двуокиси кремния на монокристаллическом кремнии. При этом имеет место упорядочение структуры окисла в объеме слоя, а именно, формирование сетки шестизвенных колец кремний-кислородных тетраэдров и вытеснение напряженных связей из глубины окисного слоя к границам раздела. Другими словами, при наличии напряженных связей в объеме окисного слоя исходной МДП-структуры, происходит их разрыв в процессе первичного облучения. Восстановление разорванных связей при последующем термическом отжиге приводит к структурному упорядочению объема окисного слоя и повышению упругих напряжений на границах раздела. Перераспределение упругих напряжений в окисной пленке и является фактором, определяющим необратимый характер радиационно-термического воздействия, в результате которого меняется пространственное распределение напряженных Si-O связей, являющихся центрами дырочного захвата.

2. Локальное тестирование в РЭМ

Как отмечалось ранее, воздействие радиации на МДП-элементы ИС может приводить к их деградации за счет появления радиационно-индуцированных токов утечек и пробоя.

При этом характер деградации определяется их конструктивно-технологическими особенностями. Локальное тестирование таких элементов в РЭМ позволяет выявить радиационно-чувствительные участки, определяющие работоспособность схемы в целом.

В эксперименте исследовалось поведение МДПТ при облучении как транзистора целиком, так и его отдельных локальных областей. Чтобы обеспечить разделение радиационных эффектов в различных областях транзистора, электронный пучок фокусировался до размера пятна с диаметром ≤ 1 мкм. Было использовано четыре режима облучения, которые с помощью вариации времени сканирования и величины тока электронного зонда подбирались таким образом, чтобы при изменении облучаемой площади, мощность экспозиционной дозы и интегральная величина дозы оставались постоянными. Все измерения ВАХ производились через одинаковое время (около 10^2 с) после прекращения облучения.

В результате проведенных экспериментов было обнаружено, что после облучения n -канальных транзисторов изменяется вид их вольтамперной характеристики на подпороговом участке и появляется ток утечки (рис. 3). Величина этого тока в некотором интервале подпороговых напряжений на затворе сохраняется постоянной, не зависит от режимов облучения (величины и полярности напряжения на затворе в процессе облучения), и определяется лишь значением экспозиционной дозы.

Отсутствие управления величиной тока утечки смещением на затворе позволяет сделать вывод о том, что причиной его возникновения является утечка по периферии канала. С целью проверки этого предположения была проведена серия экспериментов по локальному облучению отдельных участков МДПТ, показанных на рис. 4 в виде площадей, ограниченных пунктиром.

На рис. 5 представлены подпороговые ВАХ n -канальных транзисторов после облучения различных областей канала. Из приведенных зависимостей следует, что величина тока утечки практически одинакова для образцов с облученной периферией (кривая 2) и образцов, облученных по всей площади канала, включая и краевые области (кривая 4). При облучении только центральной части канала транзистора величина тока утечки была су-

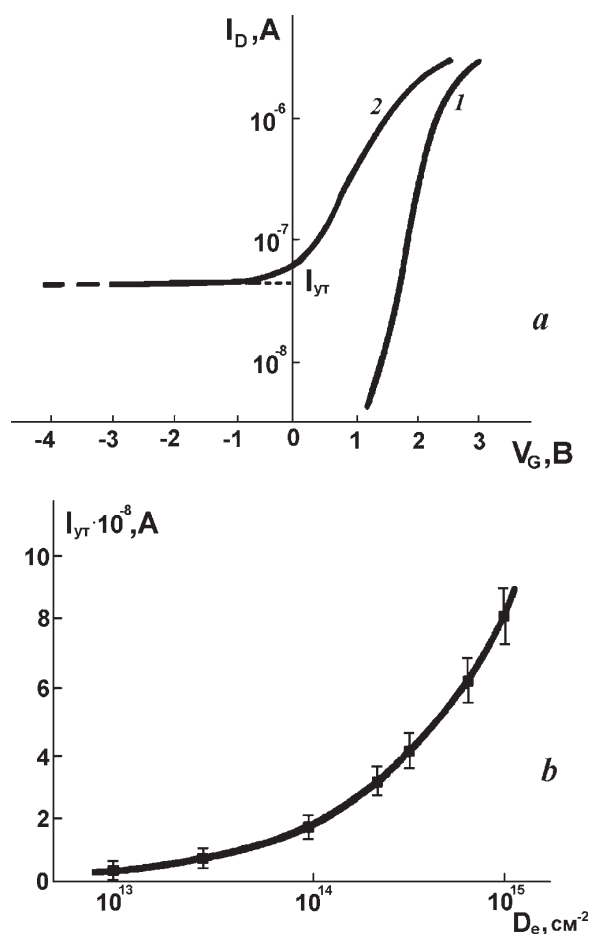


Рис. 3. Влияние электронного облучения в РЭМ на ток утечки МДПТ. *a* — подпороговые сток-затворные ВАХ n -канального транзистора: 1 — исходная ВАХ; 2 — после облучения экспозиционной дозой $D_e \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$, *b* — зависимость тока утечки от экспозиционной дозы

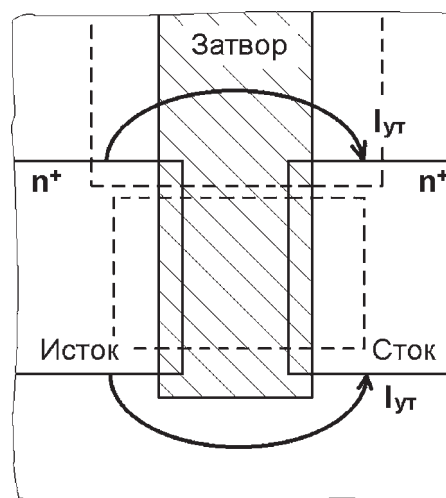


Рис. 4. Области транзистора, облучаемые электронным пучком в растровом электронном микроскопе (ограничены пунктиром)

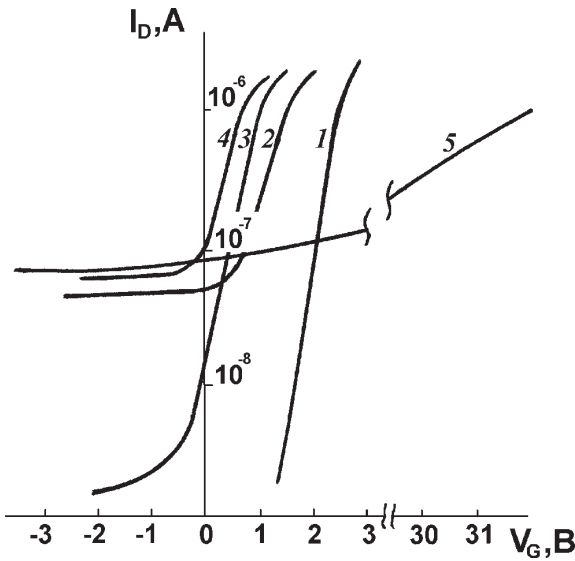


Рис. 5. Влияние локализации электронного облучения в РЭМ на подпороговые сток-затворные ВАХ n -канальных МДПТ. ВАХ МДПТ после облучения отдельных участков: 1 — исходная, 2 — облучена периферия транзистора, 3 — облучена центральная часть канала, 4 — облучен транзистор целиком, 5 — ВАХ паразитного транзистора

щественно ниже (кривая 3), хотя сдвиг порогового напряжения был практически таким же, как и в предыдущих случаях. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что в рассматриваемом случае ток утечки происходит по периферии транзистора. В результате облучения здесь образуется инверсионный слой за счет накопления заряда в окисле, однако большая толщина SiO_2 в краевой области затвора и утечки по краям затвора обеспечивают неуправляемость тока исток-сток в наблюдаемом диапазоне напряжений. Дополнительным подтверждением предлагаемого объяснения этого эффекта являются измерения на «паразитном» полевом транзисторе (кривая 5). Тестовый «паразитный» транзистор выполнен на том же кристалле, что и активный транзистор, имеет такую же геометрию, и отличается лишь толщиной подзатворного окисла, которая равна толщине окисла на периферии активного транзистора (1 мкм). Величина тока утечки в таком транзисторе после облучения практически совпадает с соответствующими значениями активного транзистора.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что радиационные воздей-

ствия на n -канальные МДПТ приводят к появлению токов утечек, протекающих от истока к стоку и неуправляемых потенциалом затвора (рис. 4). Причиной их появления является формирование за счет облучения инверсионного слоя, локализованного в периферийной области LOCOS. Сложение токов утечек отдельных транзисторов вызывает увеличение тока потребления всей схемы и превышение допустимых значений, что может явиться причиной деградации МДП БИС. При этом значения пороговых напряжений активных транзисторов могут оставаться в пределах нормы.

Таким образом, радиационное тестирование низкоэнергетическими электронами в РЭМ с локальным облучением позволяет выявить радиационно чувствительные участки БИС и идентифицировать причины их деградации.

Примером еще одного из направлений использования РЭМ в качестве инструмента для радиационного тестирования МДПТ является имитация различного рода эффектов.

Известно, что в МДПТ с коротким каналом при больших потенциалах на стоке возможен «разогрев» носителей в канале и заброс их в подзатворный диэлектрик в пристокковой области [11, 12]. Это приводит к накоплению в этой области диэлектрика эффективного заряда и генерации на границе раздела с полупроводником поверхностных состояний, что может стать впоследствии причиной деградации прибора. В работах [13, 14] проведено сопоставление воздействия рентгеновского излучения и эффекта «разогрева» носителей на параметры МДП конденсаторов и транзисторов с целью возможного использования этого эффекта для моделирования воздействия на них радиации. Однако представляет интерес обратная задача — прогнозирования возможной деградации короткоканальных приборов из-за «разогрева» носителей. Один из методов решения этой проблемы — длительные испытания при повышенных напряжениях на стоке.

На рис. 6 (кривая 1) приведена исходная подпороговая сток-затворная характеристика p -канального МДПТ и ВАХ, измеренная после выдержки транзистора при повышенном напряжении на стоке ($V_D = -30$ В) в течение 10 часов при поддержании постоянно-

го тока в канале $I_D = 10^{-6}$ А (кривая 2). Можно отметить изменение наклона ВАХ, сдвиг порогового напряжения и появление в подпороговой области участка, слабо зависящего от напряжения на затворе МДПТ. Вид полученной ВАХ характерен для случая повышенной концентрации ПС в пристокковой области границы раздела полупроводника с окислом [4]. Это позволяет сделать предположение о возможности моделирования эффекта «горячих» носителей воздействием на МДПТ ионизирующих излучений в условиях, обеспечивающих повышенную генерацию ПС вблизи стока, что достаточно легко может быть осуществлено облучением в РЭМ. На том же рисунке приведены ВАХ МДПТ после воздействия потока электронов. Кривая 3 получена при измерении МДПТ, с облученной в РЭМ пристокковой областью канала, а кривая 4 — при облучении рентгеном (25 кэВ) с напряжением на стоке $V_D = -5$ В. Следует отметить, что время проведения подобных испытаний составляет не более нескольких минут, и они могут быть рекомендованы для проведения экспрессного тестирования МДП БИС.

ВЫВОДЫ

1. Методом исследования радиационно-индуцированного токопереноса в подзатворных слоях МДП транзисторов установлено, что радиационная проводимость подзатворных слоев двуокиси кремния чувствительна к их структурному состоянию, которое не проявляется в «темновых» электрофизических характеристиках МДПТ, но определяет радиационную стойкость приборов. Обнаружен эффект повышения радиационной проводимости слоев двуокиси кремния в результате радиационно-термических воздействий, коррелирующий с повышением радиационной чувствительности МДПТ.

2. Показана возможность использования локального воздействия электронным пучком для выявления участков ИС с повышенной радиационной чувствительностью, определяющих устойчивость схемы в целом. С использованием локального облучения установлено, что радиационная деградация серийных МДП ИС, изготовленных по технологии LOCOS, обусловлена повышением тока потребления за счет токов утечек по периферии канала МДПТ. Разработан метод ускоренных испы-

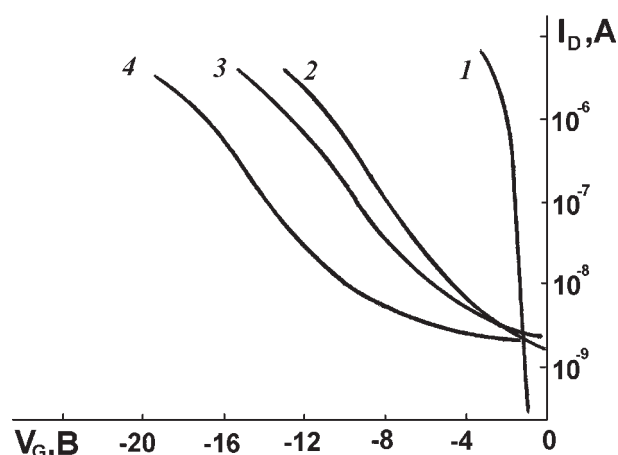


Рис. 6. Подпороговые сток-затворные ВАХ p-канальных МДПТ. 1 — исходная; 2 — после выдержки под напряжением $V_D = -30$ В, $I_D = 10^{-6}$ А, 10 часов; 3 — облучена пристокковая область канала в РЭМ дозой $D_e = 10^{15}$ см $^{-2}$; 4 — облучение рентгеном (25 кэВ) дозой $5 \cdot 10^9$ Р при подаче напряжения на сток $V_D = -5$ В. Измерения при $V_D = -16$ В

таний короткоканальных МДП транзисторов, основанный на имитации кратковременным локальным облучением пристокковых областей приборов эффектов их долговременной деградации за счет разогрева носителей в канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат. 1988. 256 с.
2. Galloway K.F., Gaitan M., Russel T.I. // IEEE Trans. Nuclear Science. 1984. V. NS-31, № 6. P. 1497—1502.
3. McWhorter P.J., Winokur P.S. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48b. № 2. P. 133—135.
4. Левин М.Н., Кадменский С.Г., Литманович В.И., Татаринцев А.В., Чернышев В.Е. // Микроэлектроника. 1992. Т. 21. № 2. С. 34—41.
5. Левин М.Н., Гитлин В.Р., Татаринцев А.В., Остроухов С.С., Кадменский С.Г. // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 6. С. 408—413.
6. Ma T.P., Dressendorfer P.V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: J. Wiley. 1989. 670 p.
7. Левин М.Н., Израйлит В.Л., Татаринцев А.В., Кадменский С.Г. // ПТЭ. 1992. № 2. С. 119—122.
8. Helms C.R., Deal B.E. The Physics of SiO $_2$ and the Si-SiO $_2$ Interface. New York: Pergamon Press. 1968. 356 p.
9. Grunthaner F.J., Lelis B.F., Zamini N., Maserian J. // IEEE Trans. Nuclear Science. 1980. V. 27. № 6. P. 1640—1646.

10. Grunthaler F.J., Grunthaler P.J., Maserian J. // IEEE Trans. Nuclear Physics. 1982. V. 29. № 6. P. 1462—1466.
11. Kwok K.N., Taylor G.W. // IEEE Trans. on Electron Dev. 1983. V. ED-30. № 8. P. 871—876.
12. Tsuchiya T., Frey J. // IEEE Electron Dev. Let. 1985. V. EDL-6. № 1. P. 8—11.
13. Joshi A.B., Lo G.Q., Kwong D.L. // Solid St. Electron. 1991. V. 34. № 10. P. 1023—1028.
14. Sun J.Y.-C., Maldonado J.R., Rodriguez M.D., Laskar J., Zicherman D.S. // Extended Abstracts of the 18th (1986 International) Conference on Solid State Devices and Materials. Tokyo. 1986. P. 479—482.