

РАЗДЕЛ ФИЗИКА

УДК 621.3.049.77

РЕНТГЕНОВСКАЯ КОРРЕКТИРОВКА ПОРОГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МДП ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

© 2002 г. В. Р. Гитлин, С. Г. Кадменский, М. Н. Левин, С. С. Остроухов, А. В. Татаринцев*

*Воронежский государственный университет
Воронежский государственный педагогический университет**

Представлена технология прецизионного управления пороговыми напряжениями МДП ИС с использованием мягкого рентгеновского (10—20 кэВ) и ближнего ультрафиолетового излучений. Управление параметрами МДП ИС основано на возможности формирования стабильного радиационно-индуцированного заряда в подзатворном слое двуокиси кремния с примесью фосфора. Обобщен опыт использования разработанных радиационно-технологических процессов в серийном производстве широкого класса МДП ИС.

ВВЕДЕНИЕ

Радиационно-технологические процессы (РТП) в современной микроэлектронике основаны на воздействии различных излучений, обеспечивающих контролируемые изменения параметров полупроводниковых материалов и структур [1, 2]. РТП характеризуются простотой технической реализации и контроля, воспроизводимостью и совместимостью со стандартными технологическими маршрутами.

Исследования воздействий ионизирующих излучений на МДП интегральные схемы (ИС) первоначально проводились для решения проблем радиационной стойкости [3]. Сформировавшиеся при этом представления о нестабильности радиационно-индуцированного заряда в слоях подзатворного окисла, справедливые для технологий изготовления р-канальных МДП ИС с алюминиевыми затворами, сохранились и после перехода производства на n-канальные МДП-технологии типа LOCOS с самосовмещенными поликремниевыми затворами. Долгое время это сдерживало применение радиационных воздействий для регулировки параметров МДП ИС.

Попытки создания промышленно пригодных РТП на основе высокоэнергетических частиц и гамма-квантов тормозились низкой производительностью процессов из-за слабого поглощения таких излучений в тонких планарных слоях МДП-структур. Повышение мощности потоков высокоэнергетических из-

лучений приводило к снижению воспроизводимости РТП и существенно повышало требования к оборудованию по радиационной безопасности. Указанные факторы также препятствовали разработкам РТП, совместимым со стандартными технологическими маршрутами изготовления серийных МДП ИС.

В настоящей работе представлены РТП прецизионной регулировки пороговых напряжений МДП ИС, основанные на использовании мягкого рентгеновского и ближнего ультрафиолетового (УФ) излучений, которые были внедрены в серийное производство и позволили значительно улучшить технико-экономические показатели выпускаемой продукции.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Исследования были начаты с сопоставления воздействий на параметры МДП-структур различных видов излучения, а именно, гамма-квантов с энергией ~1,2 МэВ, мягкого и жесткого рентгеновских излучений с энергиями квантов ~15 кэВ (X1) и ~150 кэВ (X2), высокоэнергетических (~3,5 МэВ) и низкоэнергетических (10—35 кэВ) электронов, а также альфа-частиц с энергией ~5 МэВ. В качестве облучателей использовались установка с источником гамма-квантов Co^{60} , линейный электронный ускоритель ЭЛУ-4, электронный сканирующий микроскоп СЭМ-200, установка с альфа-источником Po^{210} , рентгеновская уста-

новка РУМ-17 с анодной трубкой 4ВТМ-250 (анодное напряжение $V_A = 90\text{—}250$ кВ, ток трубки $I_A \sim 15$ мА) и модифицированная установка СРМ-20 с рентгеновской трубкой БХВ-9 ($V_A = 15\text{—}40$ кВ, $I_A = 50$ мА). В применявшихся трубках не менее 70 % потока рентгеновских квантов излучалось с энергией $E_x \sim 2/3V_A$. Экспозиционная доза рентгеновского излучения контролировалась ионизационным дозиметром RFT-VA 7 с точностью не хуже 5 %. Неравномерность потока излучения по поверхности пластин диаметром 100 мм не превышала 10 %.

Облучение проводилось на финишной стадии изготовления МДП ИС перед резкой пластин на кристаллы. Исследовались пластины с *p*- и *n*-канальными МДП ИС, КМОП ИС, КНС ИС. Каждая пластина имела отдельные кристаллы с набором специальных тестовых структур (ТС), отражающих схемотехнические особенности, топологические допуски и технологию изготовления контролируемых изделий [4, 5]. ТС использовались для выявления радиационно-чувствительных параметров МДП ИС и оценки их термостойкости. Корреляция параметров ТС и ИС обеспечивалась их формированием на рабочих пластинах (по 3—5 отдельных кристаллов на пластине) и изготовлением в едином технологическом маршруте. Однородность распределения параметров МДП-структур по пластине оценивалась по параметрам ТС на рабочих кристаллах.

При всех видах исследованных излучений радиационную чувствительность проявили пороговые напряжения активных транзисторов $V_{пор}$, крутизна сток-затворных характеристик S и токи поверхностных утечек.

Дозовые зависимости сдвига $V_{пор}$ имели подобный вид для всех типов радиационных излучений. Они характеризовались линейной зависимостью на начальной стадии облучения и выходили на насыщение при экспозиционной дозе $D > 10^5$ Р. Типичные дозовые зависимости $V_{пор}$ представлены на рис. 1. Смещение $V_{пор}$ в область отрицательных потенциалов и падение S являются следствием накопления радиационно-индуцированного положительного заряда в подзатворном диэлектрике и увеличения плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела подзатворного диэлектрика с подложкой. Дозовые зависимости смещения $V_{пор}$ показыва-

ют, что эффективность воздействия увеличивается с ростом сечения взаимодействия излучения с веществом в следующей последовательности — гамма-кванты, X2, X1, электроны, альфа-частицы. Существенно то, что часть радиационно-индуцированного заряда не устраняется термическим отжигом во всем диапазоне неразрушающих температур (кривая 4 на рис. 1). При этом, величина термостабильного изменения $V_{пор}$ определяется только экспозиционной дозой и не зависит от вида излучения. Этот результат явился предпосылкой для разработки радиационных методов управления $V_{пор}$ на финишных этапах изготовления МДП ИС.

На рис. 2а, 2б представлены типичные сток-затворные характеристики МДП транзисторов (МДПТ) при различных видах и дозах облучения. Общей закономерностью для всех воздействий является накопление заряда в объеме подзатворного диэлектрика без заметного изменения крутизны на начальном участке дозовой зависимости ($D < 10^4$ Р). При более высоких дозах начинает превалировать генерация ПС, что проявляется в значительном падении крутизны ВАХ. При термическом отжиге восстановление параметров происходит в обратной последовательности, а именно, сначала отжигаются ПС с восстановлением крутизны МДПТ, а затем отжигается часть объемного заряда [6].

Сопоставление различных видов радиации позволило выбрать мягкое рентгеновское из-

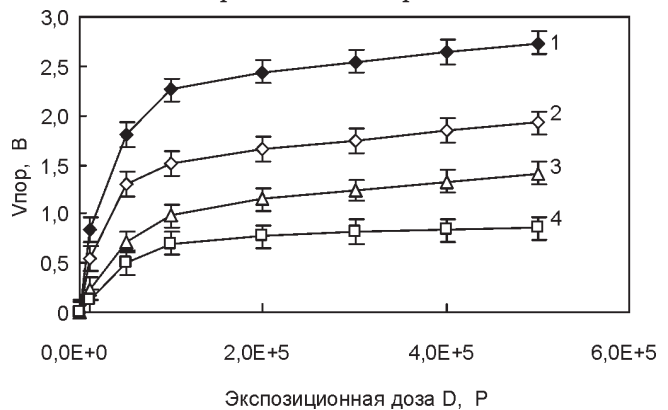


Рис. 1. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения МДПТ при различных видах ионизирующего излучения: 1 — “мягкое” рентгеновское излучение ($E_{X1} \sim 12$ кэВ); 2 — “жесткое” рентгеновское излучение ($E_{X2} \sim 120$ кэВ); 3 — гамма-излучение $Co-60$ ($E_{\gamma} \sim 1,2$ МэВ); 4 — изменения порогового напряжения облученных МДПТ после термоотжига ($450^\circ C, 20$ мин)

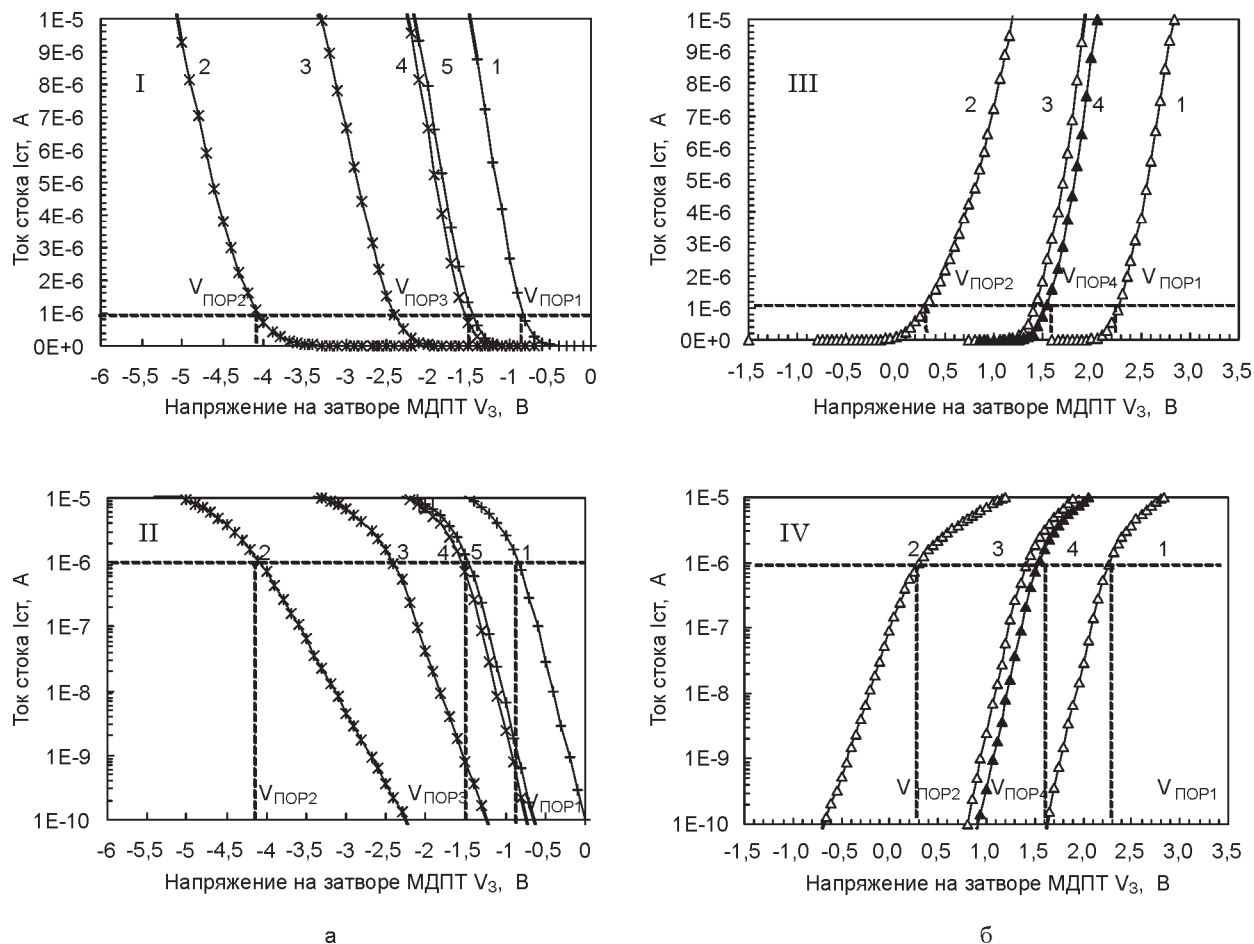


Рис. 2. Сток-затворные ВАХ р-канального МДПТ (а) п-канального МДПТ (б). I — в режиме открытого канала, II — в режиме слабой инверсии (область подпорогового тока): 1 — исходная ВАХ (до облучения МДПТ); 2 — после рентгеновского облучения дозой $5 \cdot 10^4$ P; 3, 4, 5 — через 10, 30, 90 мин отжига при $T = 400$ °C после облучения; III — в режиме открытого канала, IV — в режиме слабой инверсии (область подпорогового тока): 1 — исходная ВАХ (до облучения МДПТ); 2 — после рентгеновского облучения дозой $5 \cdot 10^4$ P; 3, 4 — через 30 и 90 мин отжига при $T = 400$ °C после облучения

лучение в качестве наиболее эффективного воздействующего фактора для изменения $V_{\text{пор}}$ МДП ИС за счет формирования термостабильного заряда в слоях подзатворного окисла.

Известно, что эффективность излучения возрастает с увеличением сечения захвата $s \sim \text{const} (E_x)^{-7/2}$, однако, оптимальный энергетический диапазон лежит в пределах 10—20 кэВ. При более низких энергиях происходит интенсивное поглощение излучения в верхних пассивирующих слоях МДП-структуры, что снижает эффективность воздействия [7].

Таким образом, мягкое рентгеновское излучение в диапазоне 10—20 кэВ обеспечивает эффективное накопление заряда в подзатворном диэлектрике, не создает структурных дефектов в полупроводнике и легко контролируется. В качестве источников рентгеновского излучения могут быть использованы

модификации промышленных установок. Модифицированные установки малогабаритны и просты по конструкции, имеют большую мощность излучения и надежную радиационную защиту. Они не требуют специальных помещений и особых условий эксплуатации, а также легко встраиваются в производственные технологические линейки. Опыт эксплуатации подобной рентгеновской облучательной установки в серийном производстве МДП ИС обобщен в [8].

РЕНТГЕНОВСКАЯ КОРРЕКТИРОВКА ПОРОГОВ МДП ИС

Типичные кривые изотермической релаксации $V_{\text{пор}}$ облученных МДПТ представлены на рис. 3. Облучение приводит к образованию положительного заряда, имеющего две со-

ставляющие с различной термополевой стабильностью.

Отжигаемая (нестабильная) часть радиационно-индуцированного заряда подзатворного диэлектрика, как известно, обусловлена захватом дырок на напряженных Si-O и/или Si-Si связях [9].

Величина стабильной части радиационно-индуцированного изменения $V_{пор}$ составляет от 30 до 70 % от его начального изменения в зависимости от технологии МДП ИС и связана с содержанием примеси фосфора в слое подзатворной двуокиси кремния. Неотжигаемая (стабильная) часть радиационно-индуцированного заряда представляет собой заряд ионизированных атомов пятивалентной примеси (фосфора), замещающих атомы кремния в кислородных тетраэдрах стеклообразной двуокиси кремния. Заряженные примесно-кислородные тетраэдры $(PO_4)^+$ встроены в сетку SiO_2 и неподвижны, что обеспечивает высокую термополевую стабильность этого заряда.

После радиационной подгонки пороговых напряжений все типы МДП ИС с легированными фосфором поликремниевыми затворами были подвергнуты длительным термополевым испытаниям при температуре $T_{исп} = 150\text{ }^\circ\text{C}$ и напря-

женности электрического поля $E = 5 \cdot 10^5\text{ В/см}$ в течение времени испытания $t_{исп} = 1200\text{ ч}$. При допустимом изменении $V_{пор}$ не более 0,1 В расчетное время эксплуатации $t_{раб}$ превышает 10^8 часов, что значительно превышает нормативные требования по надежности и долговечности серийных изделий. Методика определения расчетного времени эксплуатации $t_{раб}$ представлена в [10].

Наличие стабильной компоненты радиационно-индуцированного сдвига $V_{пор}$ МДП ИС с подзатворным окислом, содержащим примесь фосфора, легло в основу разработки РТП с использованием рентгеновского излучения.

В стандартных технологиях МДП ИС фосфор вносится в слой подзатворного окисла в результате легирования поликремния при формировании проводящей поликремниевой разводки. Легирование поликремния фосфором осуществляется диффузией из термического фосфоросиликатного стекла (ФСС) или ионным легированием.

Слой ФСС толщиной 50—100 нм выращивается на поверхности поликристаллического кремния (*poly-Si*) окислением последнего в потоке $POCl_3$ при температуре $> 900\text{ }^\circ\text{C}$. Достигаемая при этом концентрация фосфора в слое ФСС составляет ~20—40 мол % P_2O_5 . Рост

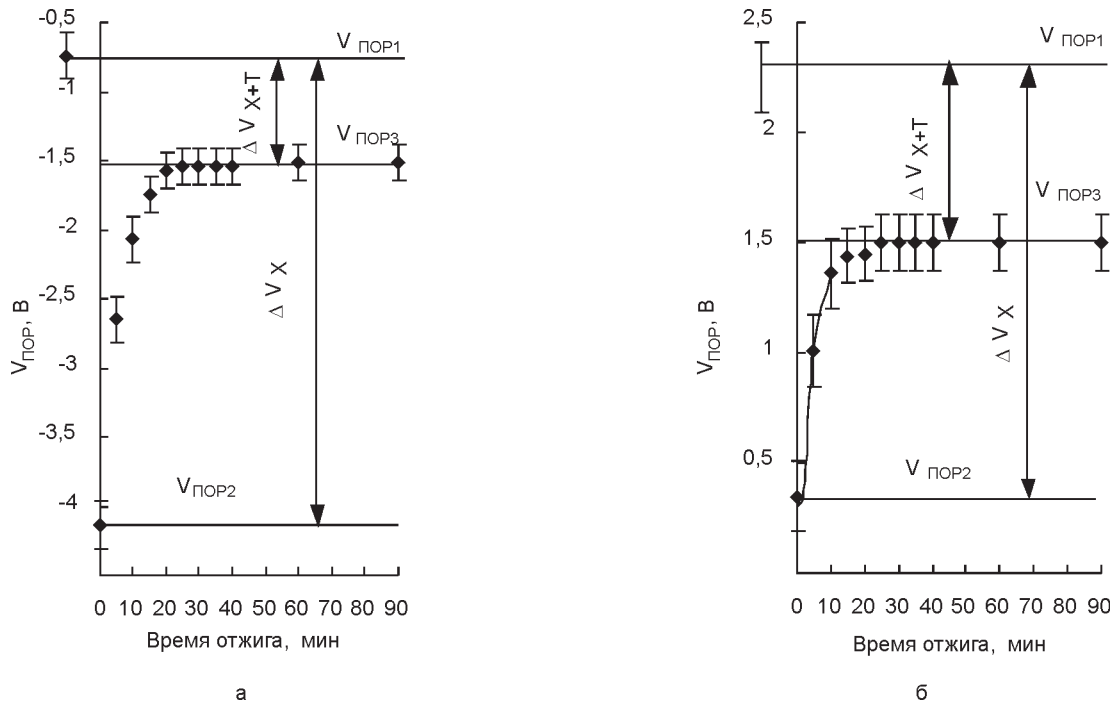


Рис. 3. Временные зависимости изменения порогового напряжения р-канального (а) и n-канального (б) облученных МДПТ при изотермическом отжиге (400 °С). Толщина диэлектрика $d = 98\text{ нм}$

термического ФСС происходит по границам зерен поликремния. При этом, легирование поликремния сопровождается ростом его зерновой структуры с выделением избыточного фосфора на границе раздела *poly-Si—SiO₂*.

При ионном легировании в поликремний имплантируются ионы фосфора из источника P_2O_5 с энергией 75—100 кэВ и дозой 1—2 мКул/см². Разрушенная при этом кристаллическая структура поликремния восстанавливается последующим отжигом при $T > 800$ °С. В процессе отжига в зернах поликремния устанавливается концентрация фосфора, соответствующая предельному значению в твердом растворе, а избыточный фосфор, выделяясь на границах зерен, достигает границы раздела *poly-Si—SiO₂*.

Для радиационной корректировки $V_{пор}$ не требуется предварительного определения количества и пространственного распределения примеси фосфора в слое подзатворного окисла. Достаточно определить изменение стабильного заряда при малой пробной дозе излучения. Чувствительность $V_{пор}$ определяется при облучении 3—5 ТС на рабочей пластине до подгонки параметров рабочих ИС. По изменению $V_{пор}$ определяют коэффициенты радиационной чувствительности с учетом термического отжига и рассчитывают дозу, требуемую для подгонки $V_{пор}$ рабочих кристаллов. Диапазон коэффициентов радиационной чувствительности для серийных МДП ИС находился в пределах $\sim 2—8 \cdot 10^{-5}$ В/Р.

Рентгеновское облучение МДП-структур приводит к повышению подпороговых токов, поверхностных токов утечек и токов питания, однако, при последующем термическом отжиге указанные токи снижаются ниже исходных значений, что можно связать с улучшением границы раздела подложки с подзатворным окислом в результате радиационно-термической обработки [11]. Кроме того, в результате радиационно-термической обработки происходит повышение пробивных напряжений подзатворных окислов на 10—15 В и значительное (в 3—5 раз) снижение первоначального разброса параметров кристаллов по площади пластины. Подчеркнем, что термическими отжигами без предварительного облучения подобные результаты не достигаются.

КОРРЕКТИРОВКА МНОГОПороГОВЫХ И КМОП ИС

Рентгеновская корректировка $V_{пор}$ дает возможность изменять пороговые напряжения только в сторону отрицательных потенциалов. Такой сдвиг $V_{пор}$ обусловлен захватом дырок, возникающих при генерации электронно-дырочных пар в слое двуокиси кремния рентгеновским излучением.

С другой стороны, УФ облучение вызывает надбарьерную фотоэмиссию электронов в подзатворный окисел из подложки и затвора. Захват фотоэлектронов на ловушки в подзатворном окисле приводит к накоплению в нем отрицательного заряда и, соответственно, сдвиг $V_{пор}$ происходит в сторону положительных потенциалов. Этим обусловлен интерес к использованию ближнего УФ излучения с энергией квантов $E_{уф} < 6$ эВ для расширения возможностей корректировки $V_{пор}$.

В данной работе в качестве источников ближнего УФ излучения использовались ртутная лампа ДРТ-1000 с линейчатым спектром и ксеноновая лампа ДКСС-1000, имеющая непрерывный спектр.

Первичное облучение УФ не изменяло исходных параметров исследовавшихся МДП-структур. УФ облучение МДП-структур, предварительно подвергнутых рентгеновской обработке, приводило к восстановлению $V_{пор}$ до исходных значений. Следует отметить, что затворы серийных МДП-структур с толщиной $> 0,5$ мкм непрозрачны для УФ квантов. Наблюдавшееся влияние УФ обусловлено тем, что слои окисла в МДП-структурах служат световодами для УФ излучения, обеспечивая его проникновение под затвор МДП-структуры.

В отличие от термического отжига, воздействие УФ после рентгеновского облучения приводит к восстановлению параметров облученных МДП-структур до исходных значений (рис. 4). Термостабильность $V_{пор}$ не зависит от степени его восстановления УФ облучением (кривые 4, 5 на рис. 4). Сохранение стабильности $V_{пор}$ после воздействия УФ излучения связано с тем, что надбарьерная фотоэмиссия приводит к захвату электронов на положительно заряженные центры $(PO_4)^+$ в окисле, только снижая величину радиационно-индуцированного заряда, но не меняя его природу [12].

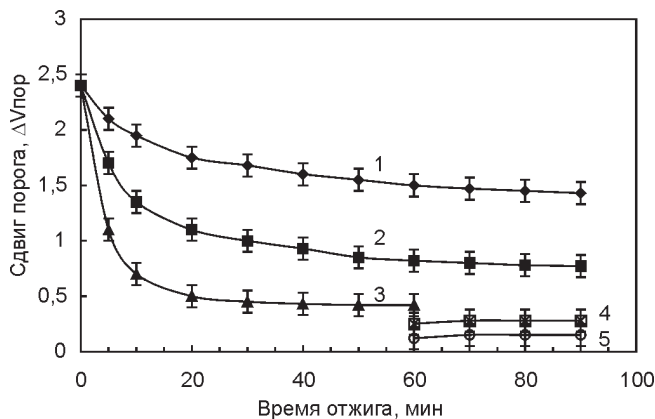


Рис. 4. Временная зависимость порогового напряжения, сформированного ионизирующей радиацией, облученных МДПТ: 1 — 150, 2 — 250, 3 — 450 °C. Кривые 4, 5 представляют результаты УФ-обработки после часового отжига ($T = 450$ °C) облученных рентгеновским излучением МДПТ с добавочным получасовым термическим отжигом при той же температуре $T = 450$ °C. УФ-экспозиция 5 и 10 с для кривых 4 и 5 соответственно

Регулируемое изменение термостабильного радиационно-индуцированного заряда в подзатворном окисле при последовательной обработке рентгеновским и УФ-излучениями позволяет повысить прецизионность корректировки параметров и расширяет возможности методов радиационной технологии. Становится возможной индивидуальная подгонка УФ-облучением $V_{пор}$ каждого рабочего кристалла ИС на пластине после предварительной интегральной рентгеновской обработки всей пластины [13]. Способ обеспечивает воспроизводимость $V_{пор}$ 100 % кристаллов по пластине.

РТП с последовательной обработкой рентгеновским и УФ-излучениями позволяет проводить одновременную корректировку двух или более независимых параметров МДП ИС [14].

Кроме того, рентгеновская и УФ-обработки могут быть эффективно использованы для снижения технологического разброса параметров по пластине без изменения статистического максимума начального распределения параметров [15]. Подчеркнем еще раз, что указанные выше результаты не могут быть достигнуты какими-либо термообработками без рентгеновского и УФ-воздействий.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ РТП В ПРОИЗВОДСТВЕ МДП ИС

Итак, последовательное воздействие мягкого рентгеновского и ближнего УФ-излуче-

ний в сочетании с термическими отжигами обеспечивает корректировку двух и более независимых параметров КМОП и многопороговых МДП ИС.

Базовый метод рентгеновской корректировки $V_{пор}$ МДП ИС включает следующие операции [16]:

- тестирование пластины по МДПТ ТС рабочих кристаллов МДП ИС из технологической партии малой дозой рентгеновского излучения и термического отжига для определения коэффициента радиационной чувствительности $V_{пор}$;
- измерение $V_{пор}$ МДПТ ТС по 5 кристаллам каждой пластины технологической партии для определения средних значений пороговых напряжений на пластине;
- вычисление дозы рентгеновского излучения, необходимого для корректировки параметров МДПТ рабочих кристаллов ИС на данной пластине;
- индивидуальная обработка пластин рентгеновским излучением расчетной дозой и последующий термический отжиг всей партии пластин.

Дальнейшее развитие рентгеновские РТП получили в направлениях:

1. РТП с двухэтапной подгонкой порогов [17].

Двухэтапная подгонка включает на первом этапе смещение $V_{пор}$ ионным легированием подзатворных областей МДП-транзисторов за пределы технологических норм в сторону положительных потенциалов, а на втором этапе — прецизионную подгонку порогов рентгеновским облучением и последующим термическим отжигом к требуемому значению.

2. РТП с повторением цикла «рентгеновское облучение — термический отжиг» [18].

Способ расширяет в несколько раз диапазон корректировки пороговых напряжений за счет аддитивного накопления термостабильного заряда в каждом цикле. На рис. 5 представлен характер изменения $V_{пор}$ МДП ИС при повторении циклов радиационно-термических воздействий. Цикл воздействия включает рентгеновское облучение дозой $D \sim 5 \cdot 10^4$ Р и отжиг при температуре 450 °C в течение 20 мин.

3. РТП с рентгеновским облучением при температуре отжига [19].

Способ существенно расширяет диапазон корректировки порогов. Эффект достигается

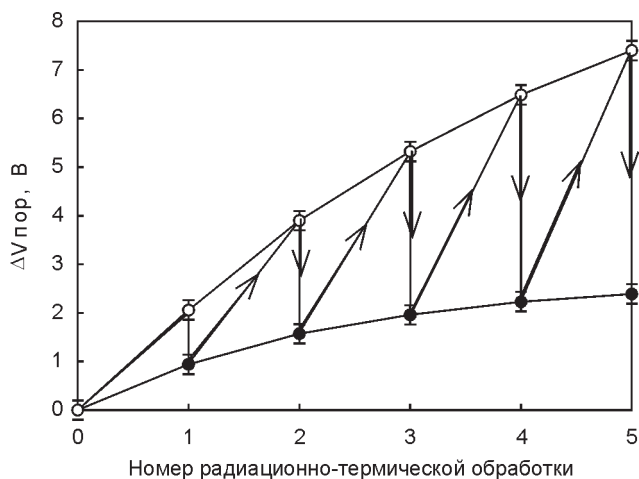


Рис. 5. Изменение порогового напряжения МДПТ при многократных радиационно-термических воздействиях. Цикл воздействия включает рентгеновское облучение дозой $D = 5 \cdot 10^4$ Р и отжиг при 450°C в течение 20 мин. Толщина диэлектрика $d = 98$ нм

за счет накопления при высокотемпературном ($\sim 450^\circ\text{C}$) облучении только термостабильной части радиационно-индуцированного заряда. При этом отжигаемая компонента не накапливается и поэтому не препятствует формированию термостабильного заряда в окисле, что недостижимо при комнатной температуре.

В условиях серийного производства МДП ИС процессы с использованием рентгеновского и УФ излучений позволяют проводить регулировку порогов с точностью не хуже $0,05$ В.

Представленные в работе РТП прошли апробацию на широком классе МДП ИС, включая схемы со структурой МОП, КМОП, КНОП, КНС, и с 1986 года успешно использовались в серийном производстве 24-х различных типов изделий. Всего с использованием рентгеновских РТП выпущено более 4,5 млн. кристаллов ИС. Эти изделия были восстановлены из окончательного брака и переведены в годную продукцию. Восстановленные изделия составили от 9 до 65 % от общего объема выпуска по различным типам изделий в разные годы. Только за первые 5 лет использования (1986—1990) экономический эффект от внедрения РТП составил более 4,2 млн. рублей в ценах конца 1990 года.

Следует особо отметить, что у изделий, изготовленных с использованием рентгеновских РТП, не было зарегистрировано случая отказа по функциональному или пара-

метрическому браку, как при испытаниях на безотказность и долговечность, так и при эксплуатации указанных изделий у потребителей в составе специальной электронной аппаратуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность радиационной корректировки пороговых напряжений серийных МДП ИС за счет формирования термостабильного радиационно-индуцированного заряда в подзатворном слое двуокиси кремния с примесью фосфора. Обоснован выбор мягкого рентгеновского излучения с энергией квантов $10\text{—}20$ кэВ в качестве оптимального воздействия для корректировки пороговых напряжений МДП ИС в условиях серийного производства.

Разработаны РТП с использованием мягкого рентгеновского и ближнего УФ излучения, полностью решающие проблему воспроизведения пороговых напряжений для широкого класса МДП ИС в условиях серийного производства.

Реализованы РТП корректировки нескольких независимых параметров в многопороговых МДП ИС и в изделиях с повышенной функциональной сложностью, а также способы снижения разброса параметров ИС по пластине.

Реальные возможности и надежность методов радиационной технологии с использованием рентгеновской обработки, УФ излучения и низкотемпературных отжигов подтверждены многолетним успешным использованием разработанных РТП в серийном производстве на больших объемах коммерческих изделий с повышенными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Внедрение разработанных РТП в серийное производство ИС обеспечило значительное повышение процента выхода годных при сохранении высоких эксплуатационных показателей изделий, что существенно улучшило технико-экономические показатели производства.

Разработанные РТП имеют широкие возможности для дальнейшего совершенствования и могут быть использованы при разработке и изготовлении новых перспективных изделий электронной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коршунов Ф. П., Богатырев Ю. В., Вавилов В. А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск: Наука и техника, 1986, 256 с.
2. Вавилов В. С., Горин Б. М., Данилин Н. С., Кив А. Е., Нуров Ю. Л., Шаховцов В. И. Радиационные методы в твердотельной электронике. М.: Радио и связь. 1990, 183 с.
3. Митчел Дж., Уилсон Д. Поверхностные эффекты в полупроводниковых приборах, вызванные радиацией. М., Атомиздат, 1970, 90 с.
4. Булгаков С. С., Десятов Д. Б., Еремин С. С., Сыроев С. С. Автоматизированный тестовый контроль производства. М. Радио и связь. 1992, С.192.
5. Гитлин В. Р., Десятов Д. Б., Еремин С. А., Фетисова С. В. // Автоматизированное проектирование машин и производственных систем, Воронеж, ВПИ, 1985, С. 75—83.
6. Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Татаринцев А. В. // Электронная техника, сер. 7, «Технология, производство и оборудование», 1990, № 6 (163), С. 9—12.
7. Вахтель В. М., Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н. // Электронная техника, сер. 7, «Технология, организация производства и оборудование», 1990, № 6 (163), С. 19—23.
8. Бугров В. П., Вахтель В. М., Гитлин В. Р., Гуменников В. В., Кадменский С. Г. // Электронная техника, сер. «Технология, организация производства и оборудование», 1990, № 6 (163), С. 13—19.
9. Ma T. P., Dressendorfer P. V., editors. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. New York: Wile—Interscience, 1989, 650 p.
10. Levin M. N., Gitlin V. R., Kadmensky S. G., Ostrouhov S. S., Pershenkov V. S. // Microelectronics Reliability, 2001, v. 41, № 2, pp. 185—191.
11. Benedetto I. M., Boesch H. F., Mc Lean F. V. // IEEE Trans Nucl Sci 1988, № 35, pp. 1260—1264.
12. Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Татаринцев А. В. // Электронная техника, сер. 7, «Технология, организация производства и оборудование», 1990, № 6 (163), С. 23—26.
13. Патент РФ № 1436768, 1993. Способ изготовления МДП БИС/ Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Остроухов С. С. и др.
14. Патент РФ № 1762688, 1993. Способ изготовления МДП БИС / Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Остроухов С. С. и др.
15. Патент РФ № 4159435, 1993. Способ изготовления МДП-транзисторов / Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Остроухов С. С. и др.
16. Патент РФ № 1176777, 1993. Способ изготовления МДП-транзисторов / Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Остроухов С. С. и др.
17. Патент РФ № 1499614, 1993. Способ изготовления МДП-транзисторов / Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Остроухов С. С. и др.
18. Патент РФ № 1752128, 1993. Способ изготовления МДП БИС/ Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Остроухов С. С. и др.
19. Патент РФ № 1419418, 1993. Способ изготовления МДП-транзисторов/ Гитлин В. Р., Кадменский С. Г., Левин М. Н., Остроухов С. С. и др.