

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ МОП ИС В УСЛОВИЯХ НИЗКО-ИНТЕНСИВНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

© 2010 М. Н. Левин, А. В. Татаринцев, Е. В. Бондаренко, А. Е. Бормонтов, В. Р. Гитлин

Воронежский государственный университет, Университетская пл. 1, 394006 Воронеж, Россия

Поступила в редакцию: 07.04.2010 г.

Аннотация. Предложена модель накопления заряда в слое стеклообразной двуокиси кремния и на поверхностных состояниях границы раздела Si — SiO₂ кремниевой МОП структуры под воздействием рентгеновского излучения, основанная на едином механизме генерации радиационных дефектов E' ($-\text{Si}=\text{O}_3$) и P_b ($-\text{Si}=\text{Si}_3$) в переходном нестехиометрическом слое с высоким уровнем упругих внутренних напряжений. На основе модели предложена методика прогноза радиационной деградации статических характеристик кремниевых МОП структур в радиационных полях низкой интенсивности (космическое излучение).

Ключевые слова: МОП ИС, дефекты, модель, радиационная стойкость, прогнозирование

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений исследований, связанных с воздействием ионизирующих излучений (ИИ) на структуру металл-окисел-полупроводник (МОП), является разработка методов прогноза радиационной стойкости МОП ИС к воздействию низко-интенсивного космического излучения.

Под воздействием ИИ в МОП структуре происходит образование радиационно-индуцированного заряда в окисле и радиационных поверхностных состояний (ПС) на границе полупроводник-окисел. Наряду с этим протекают долговременные процессы туннельной и термической разрядки заряда в окисле и на ПС. Соотношение этих процессов определяет изменение зарядового состояния МОП структуры в процессе воздействия ИИ. При действии ИИ большой мощности дозы при низкой температуре определяющим является накопление заряда и генерация ПС, туннельная разрядка не вносит существенного вклада. При малой мощности дозы, что имеет место при воздействии низко-интенсивного излучения, процессы генерации заряда и его туннельной разрядки становятся соизмеримыми.

Сложность прогнозирования радиационной стойкости МОП интегральных схем (ИС) к воздействию ИИ малой мощности дозы обусловлена тем, что проведение натуральных испытаний не представляется возможным из-за больших времен испытаний, соизмеримых со временами эксплуатации прибора. Актуальной задачей является разработка

методов прогноза, основанных на исследовании отклика МОП структуры к воздействию ИИ большой мощности дозы.

Существующие методы решения этой задачи не являются универсальными и применимы лишь для определенных технологий изготовления МОП ИС. В частности, для подзатворного окисла, содержащего водород, одной из причин зарядовой нестабильности является долговременная генерация ПС. Для прогноза поведения таких схем при воздействии ИИ разработаны тесты, включающие облучение при ИИ большой мощности дозы и последующий отжиг [1, 2]. Другой подход к прогнозированию радиационной стойкости МОП ИС — компьютерное моделирование процессов зарядовой деградации под воздействием ИИ на основе определенной физической модели, адекватно описывающей структуру. На данный момент существует несколько подобных методик тестирования [3, 4]. Эти методики используют модель генерации ПС с участием водорода, присутствующего в слое окисла.

Базовой технологией комплементарных (КМОП) ИС является технология, использующая МОП структуры с поликремниевым затвором, легированным фосфором до металлической проводимости, и подзатворным окислом, полученным окислением в сухом кислороде при температуре 1050 °С (poly-Si — SiO₂(P) — Si). Для таких структур характерна высокая концентрация внутренних упругих напряжений на границе полупроводник-окисел, что и является причиной образования

радиационно-индуцированных ПС. Для ИС, изготовленных по такой технологии необходима разработка модели, учитывающей механизм образования ПС без участия водорода.

В настоящей работе представлены результаты исследований, основанные на модели МОП структуры с поликремниевым затвором (poly-Si — SiO₂ — Si), учитывающей наличие собственных дефектов в окисле и на границе с полупроводником, являющиеся логическим развитием работ [5, 6].

МОДЕЛЬ

Анализ воздействия ИИ на МОП транзисторы (МОПТ), показывает синхронное изменение зарядов в окисле и на ПС как во время облучения, так и в процессе последующей долговременной релаксации, что позволяет сделать вывод о едином механизме процессов генерации и последующего отжига заряда, расположенного в приповерхностной области окисла и ПС системы Si — SiO₂ [7, 8]. На этом основании выбрана модель (рис. 1), которая учитывает два типа дефектов: объемные и поверхностные.

Объемные дефекты — известные собственные дефекты стеклообразной двуокиси кремния (E'-центры), равномерно распределенные по толщине диэлектрика. Такие дефекты образуются в результате захвата дырки на напряженных связях кремний-кислород, который происходит с разрушением кислородных тетраэдров стеклообразной сетки SiO₂. Поверхностные дефекты — радиационно-индуцированные ПС на границе Si-SiO₂, обусловленные P_b-центрами — трехвалентными атомами кремния (—Si≡Si₃), имеющими одну ненасыщенную валентную связь, и дающие спектр энергетических уровней, равномерно распределенный по ширине запрещенной зоны полупроводника. Зарядовое состояние P_b-центра определяется величиной и знаком поверхностного потенциала ψ_s. При отрицательных значениях ψ_s оборванная связь заполнена двумя электронами и P_b-центр становится заряженным отрицательно. При положительных значениях ψ_s оборванная связь не содержит электронов и P_b-центр заряжается положительно. При равенстве поверхностного потенциала потенциалу Ферми P_b-центры нейтральны. Таким образом, P_b-центры имеют амфотерный характер и ведут себя как доноры в нижней половине запрещенной зоны кремния и как акцепторы в верхней половине зоны.

Генерируемые под воздействием ИИ электронно-дырочные пары разделяются электрическим полем, и более подвижные носители

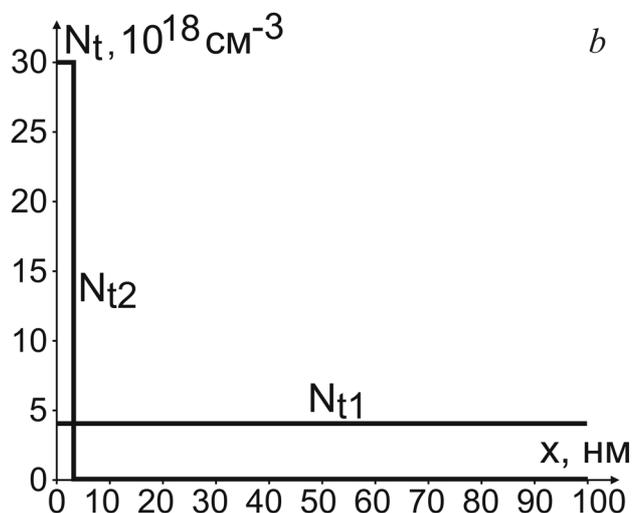
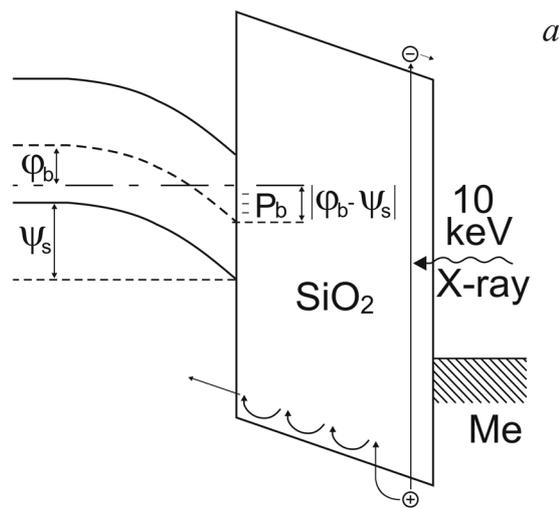


Рис. 1. Схема уровней (а) и распределение объемных и поверхностных дефектов по толщине диэлектрика (б)

(электроны) покидают окисел. При этом в диэлектрике происходит захват дырок, медленно двигающихся на ловушечные уровни SiO₂.

При проведении моделирования воздействия ИИ на МОП структуру выбраны следующие параметры модели. В диэлектрике имеется два типа уровней дефектов. Первый — глубокий уровень с предельной концентрацией дефектов N₁ до 4·10¹⁸ см⁻³, соответствует радиационно-индуцированным E'-центрам, равномерно распределенным по толщине диэлектрика. Второй тип дефектов — индуцированные излучением ПС (P_b-центры) — расположены в слое толщиной 10 нм вблизи границы Si — SiO₂ и дают равномерно распределенный по ширине запрещенной зоны полупроводника спектр энергетических уровней с предельной концентрацией N₂ до 3·10¹⁹ см⁻³.

Численное моделирование процессов накопления радиационного заряда в структуре poly-Si-SiO₂(P) — Si проводилось с использованием системы уравнений [9], которая включает уравнения непрерывности для свободных электронов и дырок, уравнение Пуассона и уравнения, описывающие кинетику накопления дырочного заряда на ловушечных уровнях.

В расчетах принято: энергия квантов рентгеновского излучения 20 кэВ, экспозиционная доза до 5×10^5 рентген (Р), мощность дозы ИИ 100 Р/с, концентрация легирующей примеси в полупроводнике $N_B = 10^{15}$ см⁻³, материал затвора — легированный фосфором поликремний, энергия ионизации E' -центра $E_{i1} = 0,65$ эВ, подвижность электронов $\mu_n = 10^2$ см²В⁻¹с⁻¹, подвижность дырок $\mu_p = 0,6 \times 10^{-3}$ см²В⁻¹с⁻¹.

Полевые зависимости сечений захвата дырки $\sigma_p(E)$ и электрона $\sigma_n(E)$ имеют вид [10]

$$\sigma_p(E) = 1.4 \cdot \sigma_p^s (1.0 + 1.9 \cdot 10^{-4} E^{\sigma_p^f})^{-1} \quad (1)$$

$$\sigma_n(E) = \sigma_n^s (1.0 + 10^{-4} E^{\sigma_n^f})^{-1} \quad (2)$$

где $\sigma_{n,p}^{f,s}$ — варьируемые параметры, определяющие абсолютную величину и характер полевой зависимости сечений захвата.

Туннельный и термический механизмы разряда накопленного заряда в слое диэлектрика описываются выражениями [11]

$$P_i(x, t) = P(0, t) \cdot \exp(-\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot t), \quad (3)$$

$$P_i(E_i, t) = P(E_i, 0) \cdot \exp(-AT^2 \cdot \exp(-E_i/kt) \cdot t), \quad (4)$$

где α и β — частотный и барьерный факторы, соответственно ($\alpha \equiv \hbar/16m^*\sigma_p$; $\beta \equiv m^*\Delta E_i/2h$; ΔE_i — высота барьера, m^* — эффективная масса электрона, h — постоянная Планка, E_i — энергия дырочного центра, A — феноменологический параметр, который зависит от природы дырочного центра).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель позволила провести анализ влияния параметров модели на характер изменения основного технологического параметра МОП ИС — порогового напряжения МОПТ. Анализировалось влияние параметров сечений захвата для электронов и дырок $\sigma_{n,p}^{f,s}$, подвижностей электронов и дырок $\mu_{n,p}$, предельной концентрации E' и P_b -центров $N_{i1,2}$, энергии активации E' -центров. Коэффициенты полевой зависимости сечений захвата для электронов и дырок σ_n^f и σ_p^f изменялись в пределах (0,1—1,5); коэффициент сечения захвата электронов σ_n^s — в диапазоне ($5 \cdot 10^{-16}$ — $5 \cdot 10^{14}$) см⁻², дырок σ_p^s — ($5 \cdot 10^{-14}$ — $5 \cdot 10^{-12}$) см⁻²; концентрация ловушек в

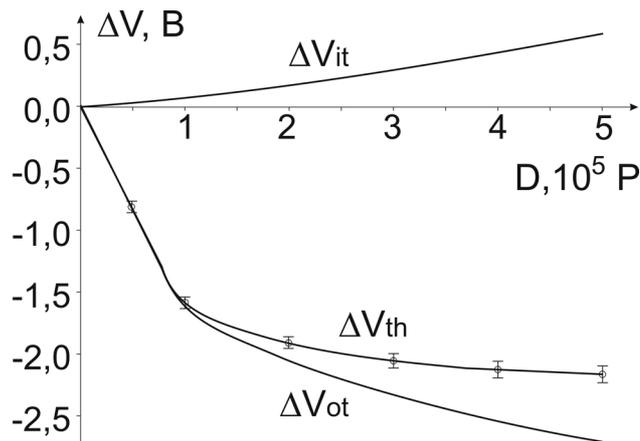


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения ΔV_{th} и его составляющих ΔV_{ot} и ΔV_{it}

окисле N_{i1} — (10^{18} — 10^{20}) см⁻³, на ПС N_{i2} — (10^{19} — 10^{21} см⁻³); подвижность электронов μ_n — (1—200 см²В⁻¹с⁻¹), дырок μ_p — (10^{-6} — 10^{-2} см²В⁻¹с⁻¹); толщина слоя окисла — (17—100) нм.

Установлено, что при изменении перечисленных параметров расчетные дозовые зависимости изменения порогового напряжения МОПТ ΔV_{th} и его составляющих, связанных с зарядом в окисле ΔV_{ot} и на ПС ΔV_{it} имеют подобный вид и включают участок практически линейного роста с последующей тенденцией к насыщению. В качестве примера на рис. 2 приведены экспериментальная кривая изменения порогового напряжения n -канального МОП транзистора [9] и расчетные зависимости этого напряжения и его составляющих, полученные путем вариации параметров модели. Хорошее соответствие расчетной и экспериментальной дозовых зависимостей порогового напряжения свидетельствует об адекватности предлагаемой модели.

Переход дозовой зависимости порогового напряжения от линейной зависимости к сублинейной связан с формированием потенциальной ямы для электронов внутри диэлектрического слоя по мере роста дозы. Это видно из координатных зависимостей напряженности электрического поля $E(x)$ и захваченного в объеме окисла дырочного заряда $P_{i1}(x)$, рассчитанных для различных доз радиации (рис. 3). Действительно, как видно из рисунка, на начальном этапе облучения поле в диэлектрике отсутствует и поэтому захват дырок происходит практически равномерно по толщине окисла. С ростом поглощенной дозы в глубине диэлектрика формируется потенциальная яма для электронов, создаваемая полем накапливаемого дырочного

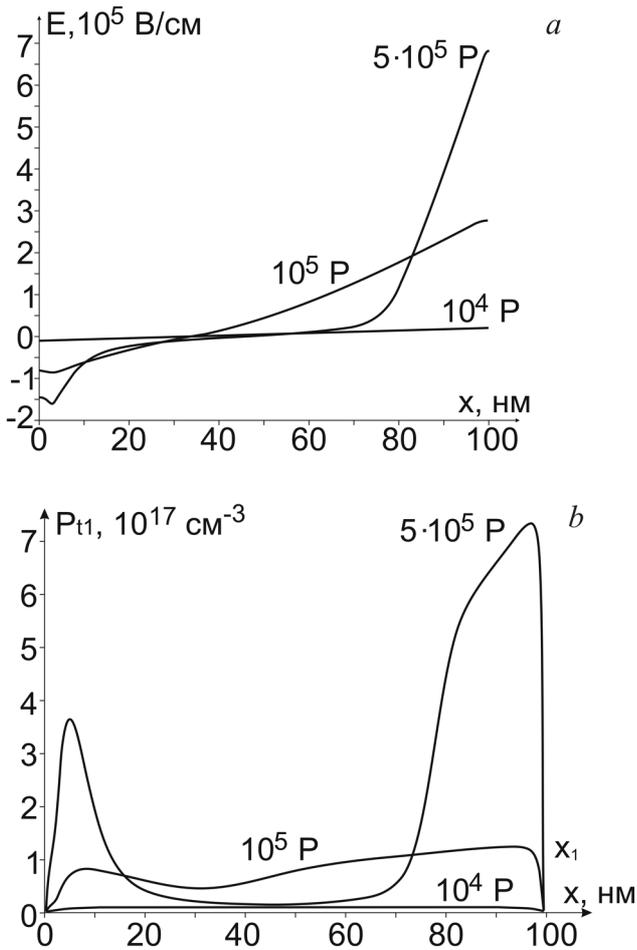


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля (а) и радиационно-индуцированного заряда (б) в подзатворном окисле облученного МОПТ

заряда. Это препятствует уходу электронов из окисла и приводит к аннигиляции ранее накопленного положительного заряда в глубине диэлектрика. Дырочный захват продолжается лишь на приграничных участках окисного слоя. Накопление дырочного заряда приводит к повышению напряженности электрического поля в областях его локализации, что приводит к уменьшению сечения захвата дырок и ограничивает дальнейший процесс накопления радиационного заряда. Такой характер изменения величины захваченного в диэлектрике заряда приводит к выходу его дозовой зависимости на насыщение. Сама точка перехода к насыщению существенно зависит от полевой зависимости сечения захвата и дозовая кривая может стать нелинейной уже при дозах порядка 10^4 P.

Установлено, что при наличии смещения на затворе V_g скорость накопления заряда в объеме диэлектрика повышается в связи с увеличением

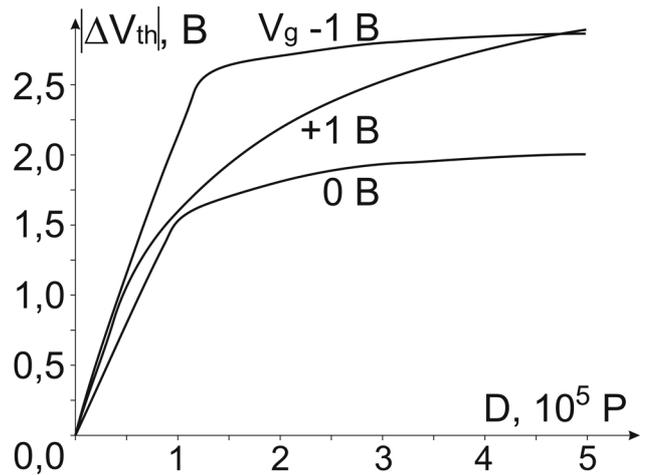


Рис. 4. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения при подаче напряжения на затвор МОПТ в процессе облучения

вероятности разделения электронно-дырочных пар во внешнем поле. При этом изменение порогового напряжения в процессе облучения оказывается более существенным при положительных смещениях, чем при отрицательных смещениях (рис. 4). Это объясняется тем, что поле захваченного в диэлектрике положительного заряда частично компенсирует воздействие отрицательно смещенного затвора и, соответственно, уменьшает темпы захвата дырок на ловушечные уровни по сравнению со случаем положительного смещения на затворе.

Следует также отметить, что при положительном смещении на затворе переход кривой к насыщению начинается при меньших дозах, что обусловлено более быстрым появлением потенциальной ямы, поэтому, в этом случае, требуется накопить меньший заряд для компенсации внешнего поля. Сдвиг порогового напряжения оказывается не симметричным по отношению к величине и знаку затворного напряжения. При этом минимальный сдвиг порогового напряжения наблюдается при положительном затворном напряжении $V_g \sim 0,3$ В. Асимметрия обусловлена контактной разностью потенциалов затвор — кремниевая подложка. Качественный вид зависимостей изменения порогового напряжения МОПТ и его составляющих от приложенного напряжения в процессе облучения (рис. 4, 5), совпадает с известными зависимостями [12], что является еще одним подтверждением адекватности предлагаемой модели.

Моделирование облучения при подаче на МОП структуру импульсного напряжения показало, что увеличение результирующего изменения порого-

вого напряжения (после выхода на насыщение) не зависит от частоты переключений, а зависит лишь от скважности импульсов, причем эта зависимость является нелинейной (рис. 6).

Моделирование влияния толщины диэлектрика на вид дозовой зависимости подтвердило известный факт, что уменьшение толщины диэлектрического слоя повышает радиационную стойкость МОП структуры (рис. 7). Уменьшение результирующего изменения порогового напряжения в процессе облучения МОП структур с тонким диэлектриком обуславливается вкладом туннелирования и изменившимся в результате уменьшения толщины окисла распределением захваченного заряда (рис. 8).

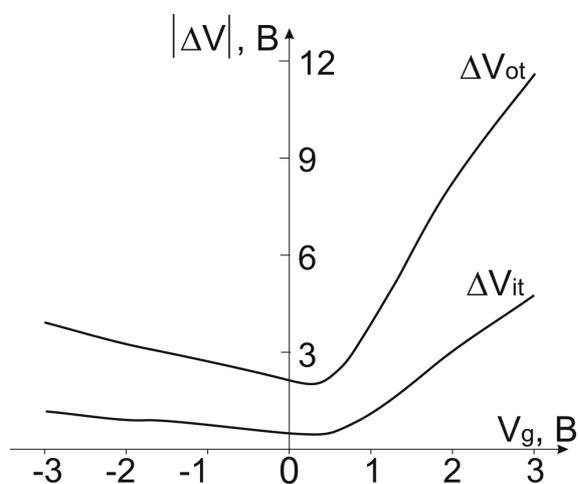


Рис. 5. Зависимости изменения составляющих порогового напряжения при дозе облучения $5 \cdot 10^5$ Р от величины затворного напряжения в процессе облучения

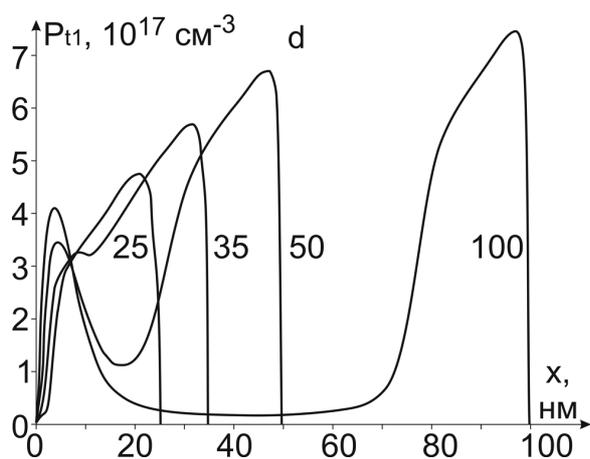


Рис. 8. Распределение заряда по глубине окисла после облучения дозой $5 \cdot 10^5$ Р для МОПТ с различной толщиной диэлектрика: 25, 35, 50 и 100 нм

Моделирование показало, что характер дозовой зависимости изменения порогового напряжения МОПТ существенно меняется при варьировании параметров модели (рис. 9) и полностью определяется значениями микроскопических параметров ловушек в окисле, а также характером зависимости этих параметров от напряженности электрического поля в окисле. Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на дозовую зависимость порогового напряжения МОПТ — это полевая зависимость сечения захвата для дырок σ_p^f и предельные концентрации объемных и поверхностных дефектов $N_{1,2}$. Следовательно, вести прогноз радиационной стойкости МОПТ по начальному

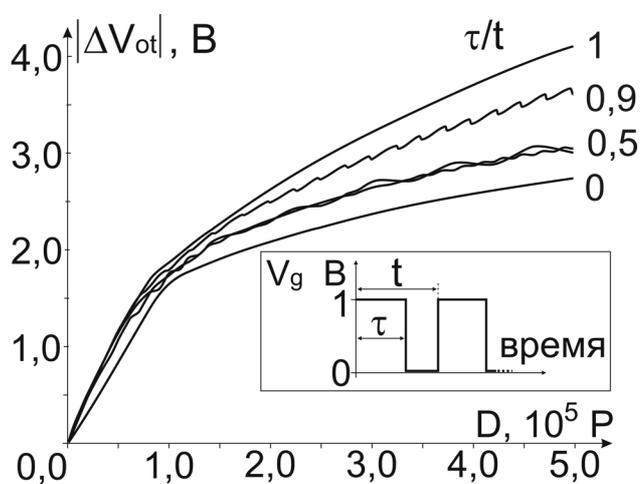


Рис. 6. Дозовые зависимости изменения составляющей порогового напряжения ΔV_{ot} при подаче на затвор в процессе облучения импульсного напряжения амплитудой +1 В. На вставке параметры импульса

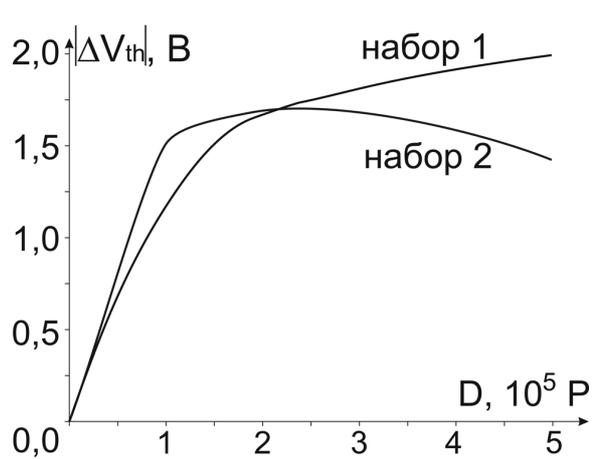


Рис. 9. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения ΔV_{th} при различных наборах параметров дефектов: $\sigma_p^f = 1,0$; $\sigma_n^f = 1,2$; $N_{11} = 10^{18}$ см⁻³; $N_{12} = 10^{19}$ см⁻³ для набора 1; $\sigma_p^f = 0,8$; $\sigma_n^f = 0,8$; $N_{11} = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³; $N_{12} = 10^{21}$ см⁻³ для набора 2; остальные параметры и условия набора дозы для обеих зависимостей одинаковы

участку дозовой зависимости не представляется возможным, если не известны параметры ловушек. Вместе с тем, если эти параметры известны, модель позволяет решить задачу прогнозирования отклика МОПТ на действие радиации как большой, так и малой мощности дозы.

Энергии активации ловушек могут быть оценены из релаксационных зависимостей составляющей порогового напряжения ΔV_{ot} при температурах, при которых происходит отжиг заряда, захваченного на соответствующие уровни ловушек (параметры E_i и A в выражении (4)). Частотный и барьерный факторы α и β , определяющие туннельную разрядку ΔV_{ot} (см. (3)), а также эффективные параметры, определяющие долговременную разрядку ΔV_{it} , могут быть определены из релаксационных зависимостей при низкой температуре, когда термическая разрядка отсутствует.

Задача определения оставшихся параметров ловушек в окисном слое и на границе Si — SiO₂ сводится к варьированию их величин для наилучшего соответствия расчетной и экспериментальной дозовых зависимостей. При этом одной дозовой зависимости изменения порогового напряжения ΔV_{th} для однозначного решения задачи недостаточно. Задача имеет однозначное решение при дополнительном анализе составляющих порогового напряжения ΔV_{ot} , ΔV_{it} и сводится к подбору таких параметров модели, чтобы минимизировать отклонение расчетных дозовых зависимостей радиационного сдвига порогового напряжения ΔV_{th} и его составляющих ΔV_{ot} и ΔV_{it} от соответствующих экспериментальных зависимостей, измеренных в реальном времени при большой мощности дозы радиации. Для решения этой задачи разработана процедура, которая включает следующие этапы: выбор диапазонов значений варьируемых параметров, потенциально содержащих локальные минимумы; нахождение значений варьируемых параметров, при которых эти минимумы достигаются в каждом из диапазонов; определение оптимального набора варьируемых параметров [6].

На основе предложенной модели, используя дозовую зависимость при большой мощности дозы ($10^2 \text{ P}\cdot\text{c}^{-1}$) и кривые изотермической релаксации ΔV_{ot} и ΔV_{it} при температурах 300 К и 750 К, были установлены следующие параметры дефектов: $\sigma_p^f = 1,0$; $\sigma_n^f = 0,8$; $\sigma_p^s = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_n^s = 10^{-14} \text{ см}^{-2}$; $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{t2} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$; $E_{t1} = 0,65 \text{ эВ}$. С использованием этих параметров, в качестве примера, рассчитана дозовая зависимость сдвига напряже-

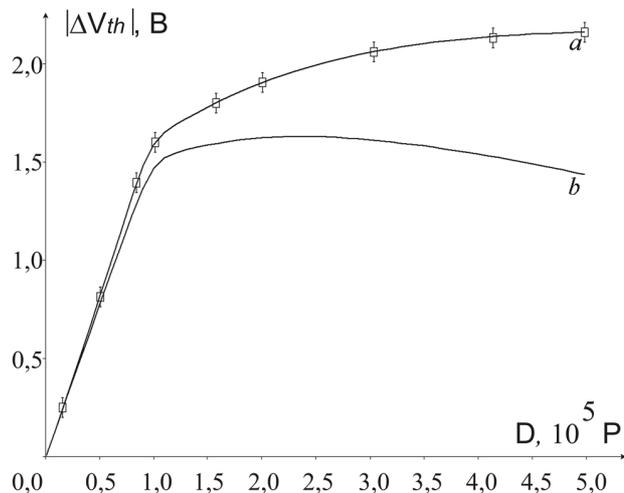


Рис. 10. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения ΔV_{th} n -канального МОПТ при различных мощностях доз: $10^2 \text{ P}\cdot\text{c}^{-1}$ (кривая a) и $10^{-1} \text{ P}\cdot\text{c}^{-1}$ (кривая b)

ния ΔV_{th} n -канального МОПТ (рис. 10, кривая b) при малой мощности дозы ($10^{-1} \text{ P}\cdot\text{c}^{-1}$).

Существенно меньшие значения радиационного сдвига ΔV_{th} в случае малой мощности дозы радиации обусловлены тем, что становятся соизмеримы процессы образования радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике вблизи границы и его туннельной разрядки. Уменьшение величины ΔV_{th} с ростом дозы радиации происходит за счет роста отрицательного заряда на ПС.

Таким образом, может быть предложена следующая методика прогноза изменения порогового напряжения МОПТ при воздействии ИИ малой мощности дозы:

1) из экспериментальной зависимости временной релаксации порогового напряжения при повышенной температуре ($T = 750 \text{ К}$), при которой вкладом туннельной разрядки можно пренебречь, определить параметры термической разрядки;

2) из экспериментальной зависимости релаксации порогового напряжения при низкой температуре ($T = 300 \text{ К}$), когда изменение напряжения происходит преимущественно за счет туннелирования, определить параметры туннельной разрядки;

3) из наилучшего совпадения экспериментальной и расчетной дозовых зависимостей изменения порогового напряжения при большой мощности дозы определить недостающие параметры ловушек в окисле;

4) рассчитать дозовую зависимость изменения порогового напряжения для необходимой мощности радиационной дозы.

ВЫВОДЫ

Построена модель накопления заряда в слое стеклообразной двуокиси кремния и на поверхностных состояниях границы раздела Si-SiO₂ кремниевой МОП структуры под воздействием рентгеновского излучения, основанная на едином механизме генерации радиационных дефектов E' (-Si≡O₃) и P_b (-Si≡Si₃) в переходном нестехиометрическом слое с высоким уровнем упругих внутренних напряжений. Модель позволила адекватно описать наблюдаемые в структуре радиационно-термические эффекты.

Представленная модель позволила рассчитать дозовые зависимости изменения порогового напряжения МОПТ и его составляющих, обусловленных зарядом в окисле и на ПС. Показано, что вид этих зависимостей определяется значениями микроскопических параметров ловушек в окисле и на границе с полупроводником. Это не позволяет вести прогноз радиационной стойкости МОПТ по начальному участку дозовой зависимости изменения порогового напряжения, если не известны параметры ловушечных уровней.

Предложена методика прогнозирования процесса деградации порогового напряжения МОПТ под влиянием ИИ низкой интенсивности. Методика основана на анализе экспериментальной дозовой зависимости, измеренной в реальном времени при большой мощности дозы, экспериментальных зависимостей изотермической релаксации порогового напряжения при различных температурах и решении системы уравнений, описывающих в рамках предложенной модели процессы накопления инду-

цированного радиацией заряда в окисле и последующей его релаксации за счет туннельной разрядки и термоэмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oldham T.R., McLean F.B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 50. № 3. P. 483.
2. Fleetwood D.M., Eisen H.A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2003. V. 50. № 3. P. 552.
3. Беляков В.В., Першеников В.С., Зебрев Г.И., Согоян А.В., Чумаков А.И., Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К. // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 1. С. 31.
4. Lenahan P.M., Conley J.F. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1998. V. 45. № 6. P. 2413.
5. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Бондаренко Е.В., Гитлин В.Р., Макаренко В.А., Бормонттов А.Е. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2008. № 2. С. 30.
6. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Минин Л.А., Бондаренко Е.В., Гитлин В.Р., Бормонттов А.Е. // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века». Воронеж, 2009. Т. 2. С. 770.
7. Кадменский А.Г., Кадменский С.Г., Левин М.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 3. С. 41.
8. Levin M.N., Maslovsky V.M. // Solid State Communications. 1994. V. 90. № 12. P. 813.
9. Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р. // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 5. С. 382.
10. Benedetto J.M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. V. 34. № 6. P. 1540.
11. McWhorter P.J., S.L. Miller S.L., Miller W.M. // IEEE Trans. Nucl. Phys. 1990. V. 37. № 6. P. 1682.
12. Першеников В.С., Попов В.Д., А.В. Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.

Левин Марк Николаевич — профессор Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208821, e-mail: levinmn@gmail.com.

Татаринцев Александр Владимирович — профессор Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208821, e-mail: tav@box.vsi.ru.

Бондаренко Евгений Владимирович — аспирант Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208821, e-mail: ebon@bk.ru

Бормонттов Александр Евгеньевич — аспирант Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208633, e-mail: bormontovae83@mail.ru

Гитлин Валерий Рафаилович — доцент Воронежского государственного университета; тел.: (4732) 208821

Levin Mark N. — the professor, Voronezh State University; tel.: (4732) 208821, e-mail: levinmn@gmail.com

Tatarintzev Alexander V. — the professor, Voronezh State University; tel.: (4732) 208821, e-mail: tav@box.vsi.ru

Bondarenko Evgeniy V. — the post graduate student, tel.: (4732) 208821, e-mail: ebon@bk.ru

Bormontov Alexander E. — the post graduate student, tel.: (4732) 208633, e-mail: bormontovae83@mail.ru

Gitlin Valeriy R — associate professor of Voronezh State University, tel.: (4732) 208821