

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДОВОЙ ДЕГРАДАЦИИ КРЕМНИЕВЫХ МОП СТРУКТУР

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

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 17.10.2008 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 ($-\text{Si}\equiv\text{Si}_3$) в переходном нестехиометрическом слое с высоким уровнем внутренних упругих напряжений. На основе предложенной модели рассчитаны дозовые зависимости накопления фиксированного заряда в окисле и плотности поверхностных состояний для высоких и низких мощностей доз. Предложена методика прогноза радиационной деградации статических характеристик кремниевых МОП структур в радиационных полях низкой интенсивности (космическое излучение).

Ключевые слова: МОП структура. Ионизирующее излучение. Высокая/низкая мощности дозы. Поверхностные состояния. Радиационный заряд. Прогноз радиационной стойкости.

Abstract. We propose a model of the charge accumulation in the glassy SiO₂ layer and at the surface states of the Si—SiO₂ interface of a silicon MOS-structure under the X-ray irradiation. The model is based on the general mechanism of generation of the radiation defects of the E' ($-\text{Si}\equiv\text{O}_3$) and P_b ($-\text{Si}\equiv\text{Si}_3$) types in the transition non-stoichiometry layer with the high level of internal mechanical stresses. The dose dependences of the oxide fixed charge and the surface states density were calculated on the base of the model for the high and low dose rates. The technique of prediction of the MOS-structure static characteristic degradation in the low dose rate radiation fields (cosmic irradiation) was developed.

Key words: MOS Structure. Ionizing Radiation. High/Low Dose Rate. Surface States. Radiation Charge. Radiation Tolerance Prediction.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сохраняет свою актуальность тематика исследований, связанных с воздействием ионизирующих излучений (ИИ) на структуру металл-окисел-полупроводник (МОП), являющуюся основой значительной части современных ИС [1, 2]. Одним из направлений исследования является разработка методов прогноза радиационной стойкости МОП ИС к воздействию низко-интенсивного космического излучения. Суть проблемы состоит в следующем. При воздействии ИИ на МОП структуру происходит образование положительного 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 космического излучения, процессы генерации заряда и его разрядки за счет туннелирования становятся соизмеримыми.

Сложность прогнозирования радиационной стойкости МОП 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. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов прогноза, основанных на исследовании отклика МОП структуры к воздействию ИИ с большой мощностью дозы.

В настоящей работе предложена модель МОП структуры с поликремниевым затвором (poly-Si—SiO₂—Si), учитывающая наличие собственных дефектов в окисле и на его границе с полупроводником, представлены результаты

© Левин М. Н., Татаринцев А. В., Бондаренко Е. В., Гитлин В. Р., Макаренко В. А., Бормонтов А. Е., 2008

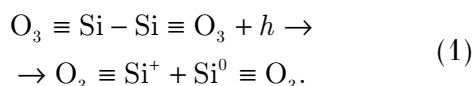
моделирования процессов накопления заряда в МОП структуре, при воздействии ИИ, а также предложена методика прогноза радиационной стойкости МОП ИС к воздействию ИИ малой мощности дозы. Методика основана на анализе экспериментальных зависимостей, измеренных при большой мощности дозы радиации, и решении системы уравнений, описывающих, в рамках предложенной модели, процессы накопления радиационного заряда в подзатворном окисле МОП транзистора (МОПТ) и последующей его релаксации за счет туннельной разрядки и термоэмиссии.

МОДЕЛЬ

Известно, что основной ячейкой термически выращенной двуокиси кремния является тетраэдр SiO_4 [3, 4]. Эти тетраэдры соединены вершинами с помощью связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ и образуют неупорядоченную сетку. Объем высококачественных окислов, выращенных в сухом кислороде, содержит, в основном, тетраэдры, соединенные в шестизвенные кольца, т. е. угол связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ составляет 144° .

Между слоем термически выращенного на кремнии SiO_2 и кремниевой подложкой существует переходной слой диэлектрика с особыми структурными свойствами, для которого характерно наличие напряженных $\text{Si}-\text{O}$ -связей. Этот слой состоит из двух областей: напряженной области толщиной от 3 до 10 нм, в которой кольца аморфной сетки состоят в основном из трех или четырех звеньев с углами связи $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ меньше 144° , и области толщиной порядка монослоя с переменным химическим составом SiO_x ($0 \leq x \leq 2$) [5].

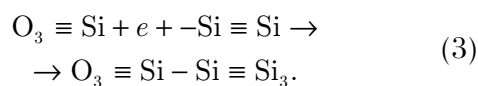
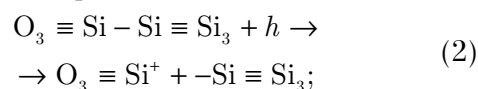
Образующиеся в результате воздействия радиации дырки способствуют разрыву напряженной $\text{Si}-\text{Si}$ связи, разрушению сетки SiO_2 , и образованию E' -центра ($\text{O}_3 \equiv \text{Si}^+$), например, по следующей реакции:



Образовавшиеся E' -центры ответственны за образование в двуокиси кремния радиационного заряда. Существование слоя с переменным химическим составом SiO_x предполагает наличие у границы диэлектрик-полупроводник большой концентрации различных нарушений. Радиационно-генерируемые дырки дрейфуют к границе раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$ и, достигая ее, приводят к трансформации дефектного состава

границы раздела с образованием поверхностных состояний. Уровни энергий ПС расположены в пределах запрещенной зоны полупроводника. Они могут обмениваться зарядом с зоной проводимости и валентной зоной кремния и изменяют свое зарядовое состояние в зависимости от положения уровня Ферми на поверхности полупроводника.

Проведенные ранее авторами исследования воздействия ИИ на МОПТ, содержащие структуры $\text{Si}-\text{SiO}_2$ с высококачественными слоями двуокиси кремния, полученными “сухим” окислением, показали синхронное изменение части заряда в окисле и на ПС как во время облучения, так и в процессе последующей долговременной релаксации [6, 7]. Это позволило сделать вывод о едином механизме процессов радиационной генерации и последующего отжига заряда, расположенного в приповерхностной области окисла, и ПС системы $\text{Si}-\text{SiO}_2$. Обнаруженные коррелированные изменения части заряда в окисле и плотности ПС на границе раздела системы $\text{Si}-\text{SiO}_2$ при их генерации в процессе радиационного воздействия и релаксации после облучения могут быть обусловлены следующими дефектными реакциями:



Например, по первой реакции захват радиационно-генерируемых дырок приводит к разрыву напряженных связей с одновременным образованием P_b -центров ($-\text{Si} \equiv \text{Si}_3$) и E' -центров ($\text{O}_3 \equiv \text{Si}^+$) в окисле. Зарядовое состояние P_b -центра определяется поверхностным потенциалом ψ_s . При отрицательных значениях ψ_s оборванная связь заполнена двумя электронами и P_b -центр отрицательно заряжен. При положительном ψ_s на оборванной связи нет электронов и P_b -центр в этом случае положительно заряжен. При равенстве поверхностного потенциала объемному P_b -центры нейтральны. Таким образом, P_b -центры имеют амфотерный характер, проявляя себя как доноры в нижней половине запрещенной зоны кремния и как акцепторы в верхней.

При проведении моделирования воздействия ИИ на МОП структуры была выбрана следующая модель. В диэлектрике имеется два типа уровней дефектов. Первый — глубокий

моноэнергетический уровень, соответствующий радиационно-индуцированным E' -центрам, равномерно распределенным по толщине диэлектрика. Второй тип дефектов — индуцированные ИИ поверхностные состояния (P_b -центры), расположенные вблизи границы Si—SiO₂ (в слое толщиной 10 нм), дающие равномерно распределенный по ширине запрещенной зоны полупроводника спектр энергетических уровней. Этот тип дефектов смоделирован ступенчатым распределением с концентрацией 10^{20} — 10^{21} см⁻³.

В процессе воздействия радиации в диэлектрике МОП структуры происходит генерация электронно-дырочных пар, разделение этих пар внешним электрическим полем, уход более подвижных носителей — электронов из окисного слоя в электроды и захват менее подвижных носителей — дырок на ловушечные центры в диэлектрике с образованием несущего положительный заряд E' -центра [8, 9]. Процесс дырочного захвата продолжается до компенсации напряженности внешнего электрического поля полем накапливаемого объемного заряда и прекращения разделения электронно-дырочных пар в электрическом поле.

На границе Si—SiO₂ происходят реакции по типу (2) с образованием E' -центров и P_b -центров. Расположенные вблизи границы с полупроводником E' -центры разряжаются за счет электронов, туннелирующих из кремниевой подложки, и не проявляют электрической активности, а заряд P_b -центров определяется величиной поверхностного потенциала полупроводника.

Численное моделирование процессов накопления радиационного заряда в структуре poly-Si—SiO₂—Si проводилось на основе системы уравнений, представленных в [10]. Модель позволила адекватно описать наблюдаемые в структуре радиационно-термические эффекты. В расчетах принято, что энергия квантов рентгеновского излучения составляет 20 кэВ, экспозиционная доза до $5 \cdot 10^5$ рентген (Р), мощность дозы ИИ 100 Р/с и 0,1 Р/с толщина слоя SiO₂ $d = 100$ нм, концентрация легирующей примеси в полупроводнике $N_B = 10^{15}$ см⁻³, материал затвора — легированный фосфором поликремний, энергии залегания уровня ловушек в объеме слоя окисла $E_{t1} = 0,65$ эВ. Полевые зависимости сечения захвата дырки на нейтральной ловушке $\sigma_p(E)$ и электрона на кулоновском

центре (захваченной дырке) $\sigma_n(E)$ имеют вид, аналогичный приведенному в [11]:

$$\sigma_p(E) = \sigma_p^s (1,0 + 1,9 \cdot 10^{-4} E^{\sigma_p^f})^{-1}; \quad (4)$$

$$\sigma_n(E) = \sigma_n^s (1,0 + 10^{-4} E^{\sigma_n^f})^{-1}, \quad (5)$$

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

Туннельный механизм разрядки накопленного заряда в слое диэлектрика может быть описан выражением [12]:

$$P_t(x, t) = P(0, t) \cdot \exp(-\alpha \cdot \exp(-\beta \cdot x) \cdot t), \quad (6)$$

где α и β — частотный и барьерный факторы, соответственно ($\alpha \equiv \hbar / 16 m^* \sigma_p$); $\beta \equiv m^* \cdot \Delta E_t / 2\hbar$; ΔE_t — высота барьера, m^* — эффективная масса электрона, \hbar — постоянная Планка.

Процесс термического отжига захваченного в диэлектрик заряда описывается выражением [12]:

$$P_t(E_t, t) = P(E_t, 0) \times \exp(-A T^2 \cdot \exp(-E_t/kT) \cdot t), \quad (7)$$

где E_t — энергия дырочного центра, A — феноменологический параметр, который зависит от природы дырочного центра.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модель позволила провести анализ влияния микроскопических параметров уровней дефектов на характер изменения основного технологического параметра МОП ИС — порогового напряжения n - и p -канальных МОПТ. Анализировалось влияние параметров сечений захвата для электронов и дырок $\sigma_{n,p}^{f,s}$, подвижности электронов и дырок $\mu_{n,p}$, концентрации объемных и поверхностных ловушек $N_{t1,2}$, их энергии активации. Установлено, что при изменении перечисленных параметров расчетные дозовые зависимости имеют подобный вид, но характер этой зависимости различен. Наиболее существенное влияние на дозовую зависимость порогового напряжения МОПТ оказывает характер полевой зависимости сечения захвата для дырок (σ_p^f) (рис. 1), а также концентрация объемных и поверхностных дефектов (рис. 2, 3). Более существенная зависимость дозовой характеристики ΔV_{th} для n -канальных МОПТ определяется разным знаком заряда в объеме диэлектрика и на ПС.

Из проведенного анализа процессов накопления радиационного заряда от микроскопических параметров уровней дефектов следует,

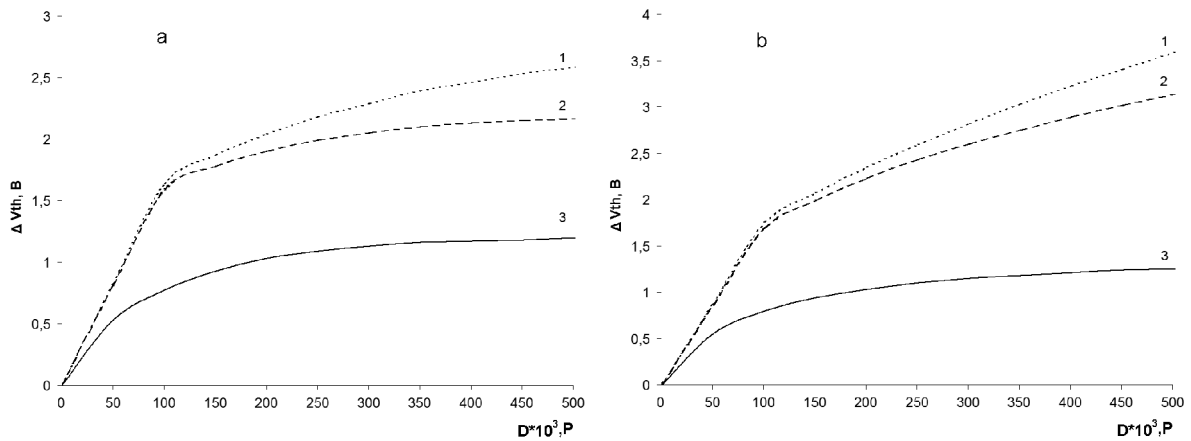


Рис. 1. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения n - (а) и p -канальных (б) МОПТ при варьировании параметра σ_p^f : 1 — $\sigma_p^f = 0,4$; 2 — $\sigma_p^f = 0,8$; 3 — $\sigma_p^f = 1,3$. ($\sigma_n^f = 0,8$; $\sigma_n^s = 10^{-14} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_p^s = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$; $\mu_n = 10^2 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $E_{t1} = 0,65 \text{ эВ}$; $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{t2} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$)

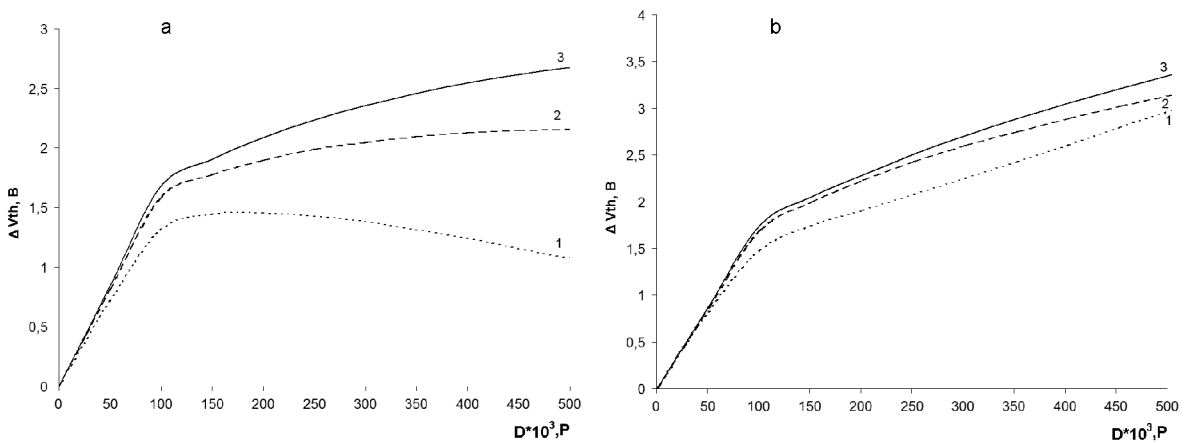


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения n - (а) и p -канальных (б) МОПТ при варьировании параметра N_{t1} : 1 — $N_{t1} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 — $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 — $N_{t1} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. ($\sigma_n^f = 0,8$; $\sigma_p^f = 0,8$; $\sigma_n^s = 10^{-14} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_p^s = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$; $\mu_n = 10^2 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $E_{t1} = 0,65 \text{ эВ}$; $N_{t2} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$)

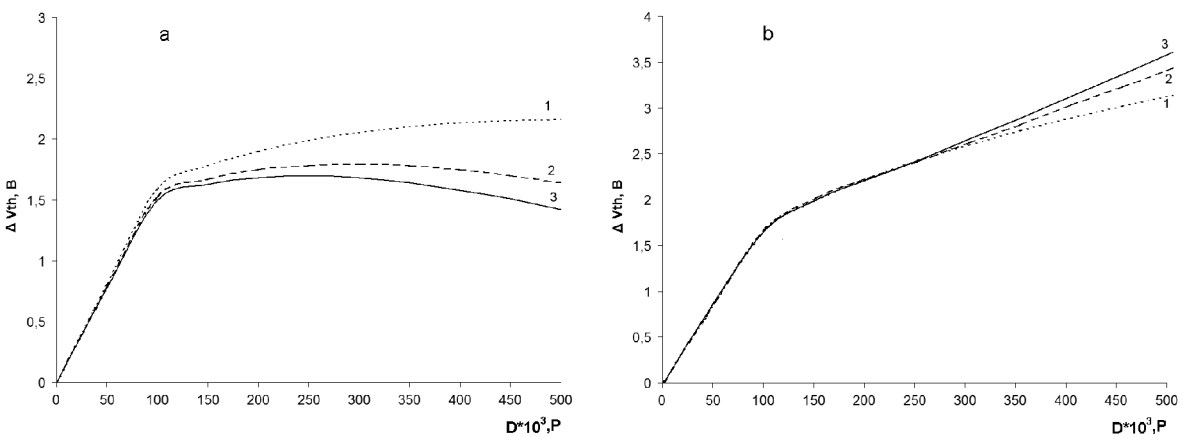


Рис. 3. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения n - (а) и p -канальных (б) МОПТ при варьировании параметра N_{t2} : 1 — $N_{t2} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 — $N_{t2} = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 — $N_{t2} = 10^{21} \text{ см}^{-3}$. ($\sigma_n^f = 0,8$; $\sigma_p^f = 0,8$; $\sigma_n^s = 10^{-14} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_p^s = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$; $\mu_n = 10^2 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$; $E_{t1} = 0,65 \text{ эВ}$; $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)

что вид дозовой зависимости определяется значениями параметров МОП структуры — концентрацией и распределением ловушек в окисле, их энергией активации, величинами подвижностей и сечений захвата для электронов и дырок, а также характером зависимости этих параметров от напряженности электрического поля в окисле. Следовательно, прогнозировать характер изменения порогового напряжения МОПТ по виду его дозовой зависимости на начальном участке или по значению изменения порогового напряжения при каком-либо фиксированном значении экспозиционной дозы не представляется возможным, если не известны микроскопические параметры ловушечных уровней. Эти параметры могут быть определены из наилучшего соответствия расчетной и экспериментальной дозовых зависимостей порогового напряжения МОПТ при варьировании соответствующих величин.

Энергии активации уровней ловушек могут быть оценены из релаксационных зависимостей ΔV_{th} при температурах, при которых происходит отжиг заряда, захваченного на соответствующие уровни ловушек (параметры E_t и A см. (7)). Параметры туннельной разрядки α и β (см. (6)) могут быть определены из зависимости ΔV_{th} от времени при низкой температуре, при которой термическая разрядка отсутствует.

Модель позволяет решить задачу прогнозирования отклика МОПТ на действие радиации малой мощности дозы. Для этого необходим анализ экспериментальной дозовой зависимости, измеренной в реальном времени при большой мощности дозы радиации, и эксперимен-

тальных зависимостей изотермической релаксации порогового напряжения при повышенной (когда вклад туннелирования мал) и низкой (когда мал вклад термической разрядки) температурах.

На рис. 4 представлены результаты моделирования решения обратной задачи, задачи определения параметров ловушек в окисле. Кривая 1 представляет собой дозовую зависимость изменения порогового напряжения ΔV_{th} , рассчитанную при следующих параметрах: $\sigma_n^f = 0,8$; $\sigma_p^f = 0,8$; $\sigma_n^s = 10^{-14}$ см⁻²; $\sigma_p^s = 1,4 \cdot 10^{-12}$; $\mu_n = 10^2$ см²В⁻¹с⁻¹; $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3}$ см²В⁻¹с⁻¹; $E_{t1} = 0,65$ эВ; мощность дозы ИИ 100 Р/с; концентрация E' -центров $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³, концентрация ПС $N_{t2} = 10^{20}$ см⁻³. Используя исходную модель, при варьировании параметров сечений захвата были определены параметры ловушек в окисле из лучшего соответствия дозовых зависимостей (кривые 1 и 2): $\sigma_n^f = 1,099$; $\sigma_p^f = 0,9$; $\sigma_n^s = 2,5 \cdot 10^{-14}$ см⁻²; $\sigma_p^s = 1,127 \cdot 10^{-12}$ см⁻².

Кривые 3, 4 представляют собой дозовые зависимости при мощности дозы ИИ 0,1 Р/с, рассчитанные с использованием исходных (кривая 3) и полученных при решении обратной задачи параметров (кривая 4).

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

1) из экспериментальной зависимости временной релаксации порогового напряжения при повышенной температуре (при этом вкладом туннельной разрядки можно пренебречь) определить параметры термической разрядки;

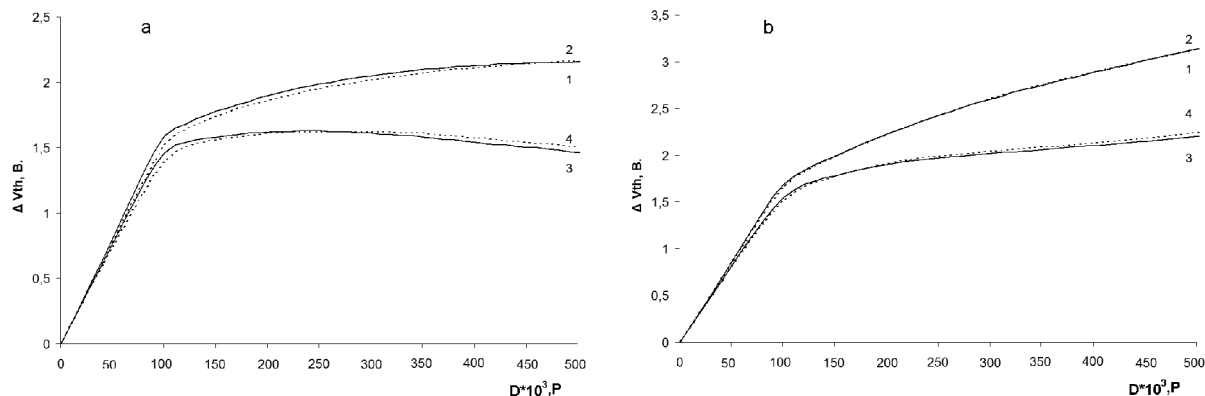


Рис. 4. Результат распознавания параметров n - (а) и p -канальных (б) МОП структур при большой мощности дозы (1 и 2), и вычисление изменения порогового напряжения при малой мощности дозы, используя исходные данные (3) и данные, полученные в процессе распознавания (4). ($\mu_n = 10^2$ см²В⁻¹с⁻¹; $\mu_p = 0,6 \cdot 10^{-3}$ см²В⁻¹с⁻¹; $E_{t1} = 0,65$ эВ; $N_{t1} = 4 \cdot 10^{18}$ см⁻³; $N_{t2} = 10^{20}$ см⁻³)

2) из экспериментальной зависимости временной релаксации порогового напряжения при низкой температуре, когда изменение происходит преимущественно за счет туннелирования, определить параметры туннельной разрядки;

3) из наилучшего совпадения экспериментальной дозовой зависимости изменения порогового напряжения при большой мощности дозы с расчетной определить недостающие параметры ловушек в окисле;

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

ВЫВОДЫ

1. 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' ($-\text{Si}\equiv\text{O}_3$) и P_b ($-\text{Si}\equiv\text{Si}_3$) в переходном нестехиометрическом слое с высоким уровнем внутренних упругих напряжений.

2. На основе предложенной модели проведено моделирование процессов накопления радиационно-индуцированного заряда в диэлектрике структуры poly-Si—SiO₂—Si и на ПС под действием ионизирующих излучений. Показано, что вид дозовой зависимости изменения порогового напряжения МОПТ определяется значениями микроскопических параметров ловушек в окисле: концентрацией и распределением ловушек в окисле, их энергией активации, величинами подвижностей и сечений захвата для электронов и дырок, а также характером зависимости этих параметров от напряженности электрического поля в окисле. Это не позволяет вести прогноз радиационной стойкости МОПТ по начальному участку дозовой зависимости изменения порогового напряжения. Наиболее существенное влияние на характер дозовой зависимости оказывает характер полевой зависимости сечения захвата для дырок и концентрация объемных и поверхностных ловушек.

3. Предложен метод прогнозирования изменения порогового напряжения МОПТ при воздействии ионизирующего излучения низкой интенсивности. Метод основан на анализе экспериментальной дозовой зависимости, измерен-

ной в реальном времени при большой мощности дозы радиации, и экспериментальных зависимостей изотермической релаксации порогового напряжения при различных температурах и решении системы уравнений, описывающих в рамках предложенной модели, процессы накопления индуцированного ионизирующей радиацией заряда в подзатворном окисле МОПТ и последующей его релаксации за счет туннельной разрядки и термоэмиссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Effects of radiation and charge trapping on the reliability of high-k gate dielectrics / J. A. Felix [et al] // *Microelectronics Reliability*. — 2004. — Vol. 44. — P. 563—575.
2. Reliability of power electronic devices against cosmic radiation-induced failure / G. Soelkner [et al] // *Microelectronics Reliability*. — 2004. — Vol. 44. — P. 1399—1406.
3. *Литовченко В. Г.* Основы физики микросистем металл-диэлектрик-полупроводник / В. Г. Литовченко, А. П. Горбань. — Киев: Наукова Думка, 1978. — 316 с.
4. *Nicollian E. H.* MOS (metal-oxide-semiconductor) physics and technology / E. H. Nicollian, J. R. Brews. — New York: Wiley, 1984. — 760 p.
5. *Grunthaner F. J.* Radiation-induced defects in SiO₂ as determined with XPS / F. J. Grunthaner, P. J. Grunthaner, J. Maserian // *IEEE Trans. Nuclear Physics*. — 1982. — Vol. 29, № 6. — P. 1462—1466.
6. Релаксационные процессы в МДП-элементах интегральных схем, вызванные ионизирующим излучением и импульсным магнитным полем / А. Г. Кадменский [и др.] // *Письма в ЖТФ*. — 1993. — Т. 19, № 3. — С. 41—45.
7. *Levin M. N.* Relaxation processes induced in Si—SiO₂ systems by ionizing radiation and pulsed magnetic field treating / M. N. Levin, V. M. Maslovsky // *Solid State Communications*. — 1994. — Vol. 90, № 12. — P. 813—816.
8. *Grove A. S.* A model for radiation damage in metal-oxide-semiconductor structures / A. S. Grove, E. H. Snow // *Proc. IEEE*. — 1966. — Vol. 54. — P. 894—895.
9. *Stanley A. G.* A model for shifts in the gate turn-on voltage of insulated-gate field-effect devices induced by ionizing radiation / A. G. Stanley // *IEEE Trans. Electron Dev.* — 1967. — Vol. 14. — P. 134—138.
10. Рентгеновская корректировка пороговых напряжений в производстве МДП интегральных схем / М. Н. Левин, [и др.] // *Микроэлектроника*. — 2002. — Т. 31, № 6. — С. 408—413.
11. Measurement of low-energy X-ray dose enhancement in MOS devices with silicide gates / J. M. Benedetto [et al] // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* — 1987. — Vol. 34, № 6. — P. 1540—1543.

12. *McWhorter P. J.* Modeling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment / *P. J. McWhorter, S. L. Miller,*

W. M. Miller // *IEEE Trans. Nucl. Phys.* — 1990. — Vol. 37, № 6. — P. 1682—1689.

Левин Марк Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры ядерной физики ВГУ; тел.: (4732) 524-075, e-mail: levin@phys.vsu.ru

Татаринцев Александр Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и математических методов экономики института менеджмента, маркетинга и финансов (ИММиФ); тел.: (4732) 308-885, e-mail: tav@box.vsi.ru

Бондаренко Евгений Владимирович — аспирант кафедры ядерной физики ВГУ; тел.: (4732) 554-915, e-mail: ebon@bk.ru

Гитлин Валерий Рафаилович — кандидат технических наук, доцент кафедры ядерной физики ВГУ; тел.: (4732) 208-821, e-mail: nuc@phys.vsu.ru

Макаренко Владимир Алексеевич — кандидат физико-математических наук, ст. преподаватель кафедры ядерной физики ВГУ; тел.: (4732) 520-569, e-mail: mva@cs.vsu.ru

Бормонттов Александр Евгеньевич — аспирант кафедры ядерной физики ВГУ; тел.: (4732) 444-550, e-mail: a_bormontov@mail.ru

Levin M. N. — Voronezh State University, Nuclear Physics Department, Professor; tel.: (4732) 524-075, e-mail: levin@phys.vsu.ru

Tatarintsev A. V. — Voronezh Institute of Economics, Management and Finances, Professor; tel.: (4732) 308-885, e-mail: tav@box.vsi.ru

Bondarenko E. V. — Voronezh State University, Nuclear Physics Department, Post-graduated student; tel. (4732) 554-915, e-mail: ebon@bk.ru

Gitlin V.R. — Voronezh State University, Nuclear Physics Department, Associated Professor; tel.: (4732) 208-821, e-mail: nuc@phys.vsu.ru

Makarenko V. A. — Voronezh State University, Nuclear Physics Department, Assistant; tel.: (4732) 520-569, e-mail: mva@cs.vsu.ru

Bormontov A. E. — Voronezh State University, Nuclear Physics Department, Post-graduated student; tel.: (4732) 444-550, e-mail: a_bormontov@mail.ru