

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МДП-СЕНСОРОВ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В РЕЖИМАХ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

В.В. АНДРЕЕВ<sup>1\*</sup>, Г.Г. БОНДАРЕНКО<sup>2</sup>, Д.В. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, А.А. СТОЛЯРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Калужский филиал, 248000, Калуга, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,  
101000, Москва, Россия

\*e-mail: vladimir\_andreev@bmstu.ru

(Поступила в редакцию 20 сентября 2019 г.)

Предложена модель, описывающая изменение зарядового состояния МДП-структур и сенсоров на их основе в условиях одновременного воздействия радиационной ионизации и сильнополевой инжекции электронов из полупроводника. В предложенной модели проводится учет взаимодействия инжектированных электронов с дырками, генерируемыми радиационной и сильнополевой ионизацией и захватываемыми на ловушки у границы раздела пленки SiO<sub>2</sub> с полупроводником, а также генерации поверхностных состояний при аннигиляции части дырок в процессе их взаимодействия с инжектированными электронами. Показано, что МДП-сенсор, находящийся в режиме сильнополевой инжекции электронов в диэлектрическую пленку, можно использовать для контроля интенсивности радиационного излучения путем определения тока радиационной ионизации из временной зависимости напряжения, падающего на сенсоре, с использованием предложенной модели. Установлено, что в режиме сильнополевой инжекции электронов возможно существенное повышение дозовой чувствительности МДП-сенсоров, но при этом оно может значительно снижаться ресурс работы и дозовый диапазон МДП-сенсора.

### 1. Введение

В настоящее время для контроля характеристик радиационных излучений в космической технике, медицине, персональной дозиметрии, при эксплуатации ядерного оборудования и других областях широко применяются сенсоры на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1–10]. В основном такие сенсоры используются для контроля поглощённой дозы радиационного излучения и изготавливаются на основе радиационно-чувствительного р-канального МДП-транзистора. Их называют RADFET (Radiation-Sensitive Field

Effect Transistor) сенсорами [1, 3, 4, 9]. Основными преимуществами таких сенсоров являются относительно широкий диапазон контролируемых доз, очень низкое энергопотребление, малый размер чувствительного элемента, быстрое неразрушающее считывание дозиметрической информации и возможность ее постоянного хранения, а также конкурентоспособная цена и возможность совмещения с электронной системой обработки информации. Одним из методов повышения чувствительности таких сенсоров является приложение к затвору транзистора положительного напряжения, в результате чего электрическое поле, создающееся в подзатворном диэлектрике, обеспечивает разделение зарядов, возникающих в результате радиационной ионизации, и ускоряет их транспорт в диэлектрической пленке [1, 11–13]. Эксплуатация RADFET сенсора в условиях приложения к затвору положительного напряжения позволяет существенно повысить величину информационного положительного заряда, накапливающегося в подзатворном диэлектрике у границы, раздела с полупроводником при той же дозе облучения и, тем самым, увеличить дозовую чувствительность сенсора. Однако, при эксплуатации RADFET сенсоров обычно используются относительно слабые электрические поля, которые значительно ниже тех, при которых наблюдаются сильнополевая инжекция заряда в подзатворный диэлектрик [1, 2, 11]. Следовательно, исследование физических процессов, наблюдающихся в тонких диэлектрических плёнках МДП-структур при одновременном воздействии ионизирующего излучения и сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, является важной задачей для повышения дозовой чувствительности RADFET сенсоров и их корректной эксплуатации в предельных режимах. Эксплуатация RADFET сенсора при протекании через подзатворный диэлектрик постоянного тока, при определенных режимах позволяет определять величину тока, создаваемого ионизирующим излучением и, тем самым, контролировать интенсивность радиационного излучения [14]. Таким образом, работа RADFET-сенсоров в режимах сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик может позволить не только повысить их дозовую чувствительность, но и использовать эти сенсоры для контроля интенсивности радиационных излучений. Ниже вместо термина RADFEET-сенсор будет использоваться термин МДП-сенсор.

В данной работе на основе экспериментальных исследований и результатов проведенного моделирования изучены зарядовые процессы, протекающие в МДП-структурах при совместном воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов в диэлектрическую пленку. Рассмотрена возможность эксплуатации МДП-сенсоров в режимах сильнополевой инжекции электронов и их использование для контроля интенсивности радиационного излучения.

## 2. МОДЕЛЬ ЗАРЯДОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МДП-СТРУКТУРЕ

Основные зарядовые процессы, протекающие в МДП-структурах при воздействии радиационного излучения, представлены на зонных диаграммах (рис.1).

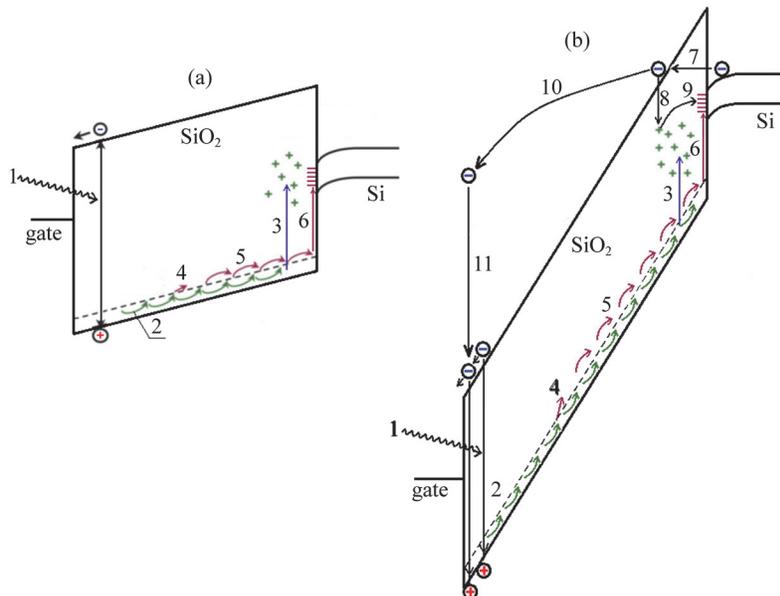


Рис.1. Зонные диаграммы МДП-структур, показывающие основные зарядовые процессы, протекающие под действием радиационного излучения для случая низких (не инжекционных) электрических полей [11] (а) и сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму туннельной инжекции электронов (б): 1 – создание электронно-дырочных пар радиационным излучением; 2 – транспорт дырок; 3 – захват дырок на ловушки в SiO<sub>2</sub> у границы с кремнием; 4 – высвобождение водорода; 5 – транспорт водорода; 6 – взаимодействие водорода с дефектами с образованием поверхностных состояний; 7 – сильнополевая по механизму Фаулера-Нордгейма инжекция электронов; 8 – аннигиляция части захваченных дырок при взаимодействии с инжектированными электронами; 9 – генерация поверхностных состояний в результате аннигиляции дырок; 10 – транспорт и разогрев инжектированных электронов в зоне проводимости SiO<sub>2</sub>; 11 – термализация горячих электронов с образованием дырок.

В слабых электрических полях, приложенных к подзатворному диэлектрику (рис.1а), согласно обзорной работе [11], воздействие ионизирующего излучения приводит к генерации электронно-дырочных пар (процесс 1). Сразу после их создания, большая часть электронов быстро перемещается по направлению к затвору (в течении пикосекунд), в то время как дырки, имеющие меньшую подвижность, чем электроны, сравнительно медленно перемещаются к границе

Si-SiO<sub>2</sub>. Ещё до того, как электроны покинут оксид, некоторые из них прорекомбинируют с дырками. Часть электронно-дырочных пар, избежавших рекомбинации, называется выходом заряда  $Y$ . Дырки, избежавшие «первоначальной» рекомбинации, движутся по оксиду по направлению к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> посредством скачкообразного перемещения по состояниям, локализованным в оксиде (рис.1, процесс 2). По мере приближения дырок к границе раздела некоторая их часть захватывается на дырочные ловушки у границы Si-SiO<sub>2</sub>, тем самым формируя положительный заряд, захваченный в оксиде (рис.1, процесс 3). Величина этого положительного заряда пропорциональна дозе облучения и описывается выражением [11, 13]:

$$p = q \cdot F_t \cdot Y(E) \cdot K_g \cdot d_{ox} \cdot D, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $F_t$  – эффективность захвата дырок ( $F_t \approx \sigma_p \cdot N_p$ );  $\sigma_p$  – сечение захвата дырочных ловушек;  $N_p$  – плотность дырочных ловушек;  $Y(E)$  – выход заряда при облучении (доля дырок, избежавших рекомбинации);  $K_g$  – количество электронно-дырочных пар на единицу дозы и объема SiO<sub>2</sub> ( $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$  (SiO<sub>2</sub>) пар);  $d_{ox}$  – толщина оксида;  $D$  – доза облучения (рад.).

В соответствии с «водородной» моделью [11,13] в пленке диоксида кремния нейтральный атом водорода H<sup>0</sup> при воздействии ионизирующего излучения захватывает образовавшуюся дырку h и становится протоном H<sup>+</sup> (рис.1, процесс 4). Затем протоны перемещаются к границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> (рис.1, процесс 5), где они могут инициировать образование P<sub>b</sub> – центров (ловушек заряда на границе раздела (рис.1, процесс 6)). Для p-канальных транзисторов такие ловушки на границе раздела являются преимущественно положительно заряженными [11]. Генерация поверхностных состояний в этом случае обычно описывается согласно [11, 15, 16] выражением

$$n_{it}(t) = N_{it} [1 - \exp(-\lambda \cdot D)], \quad (2)$$

где  $N_{it}$  – плотность поверхностных состояний при насыщении «дозового» процесса,  $\lambda$  – параметр, характеризующий скорость поверхностного дефектообразования.

Для p-канального МДП-сенсора основным параметром, характеризующим поглощённую дозу радиационного излучения, является сдвиг порогового напряжения МДП-транзистора, который определяется как [1, 17]

$$\Delta V_{th} = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} [p(d_{ox} - x_p) + n_{it} d_{ox}], \quad (3)$$

где  $\epsilon \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $x_p$  – положение центроида (относительно границы Si-SiO<sub>2</sub>) положительного заряда захваченных в SiO<sub>2</sub> дырок.

В сильных электрических полях (рис. 1b) наряду с выше рассмотренными зарядовыми процессами необходимо также учитывать сильнополевую по механизму Фаулер-Нордгейма инжекцию электронов в диэлектрическую пленку (процесс 7) [18–22]. Инжектированные электроны могут взаимодействовать с захваченными дырками, приводя к аннигиляции части положительного заряда (рис.1, процесс 8). В свою очередь, при аннигиляции положительного заряда с электронами может иметь место генерация поверхностных состояний (рис.1, процесс 9). Основная часть инжектированных электронов, перемещаясь в зоне проводимости SiO<sub>2</sub>, перемещается к затвору. При этом для толщин диэлектрических пленок более 60 нм, которые обычно используются в RADFET сенсорах, в соответствии с [18], часть электронов разогревается до энергий, больших чем ширина запрещенной зоны SiO<sub>2</sub> (рис.1, процесс 10). При их термализации может иметь место ударная ионизация с образованием дырок (рис.1, процесс 11). Эти дырки движутся к катоду и могут частично захватываться на ловушки вблизи границы Si-SiO<sub>2</sub> в дополнение к дыркам, сгенерированным радиационным облучением. В этом случае, как было показано нами в [14], для определения плотности дырок, накапливаемых в подзатворном диэлектрике при совместном действии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов, необходимо использовать уравнение:

$$q \frac{dp}{dt} = (J_{inj} \cdot \alpha + J_{rad}) \cdot \sigma_p \cdot (N_p - p) - J_{inj} \cdot \sigma_{ep} \cdot p, \quad (4)$$

где для определения плотности тока Фаулера-Нордгейма используется выражение [18, 21]

$$J_{inj} = AE^2 \exp(-B/E), \quad (5)$$

а для нахождения плотности тока, создаваемого ионизирующим излучением, применяется выражение [11, 13, 14]

$$J_{rad} = q \cdot Y(E) \cdot K_g \cdot d_{ox} \cdot I_{rad}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ионизации в пленке SiO<sub>2</sub> при сильнополевой инжекции;  $\sigma_{ep}$  – сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов (при аннигиляции части положительного заряда), имеющее полевую зависимость  $\sigma_{ep} = b_0 \cdot E^{-3}$ , где  $b_0$  – параметр модели; а  $I_{rad}$  – интенсивность облучения.

Для определения количества поверхностных состояний, генерируемых при аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами, использовалось выражение [18]

$$\frac{dn_{it}^{e-h}}{dt} = \gamma_{e-h} \frac{J_{inj}}{q} \sigma_{ep} p(E, t), \quad (7)$$

где  $\gamma_{e-h}$  – вероятность создания поверхностного состояния электронно-дырочной рекомбинацией.

Система уравнений (2–7) решалась при следующих начальных условиях  $p(0) = 0$ ;  $n_{it}(0) = 0$ ;  $n_{it}^{e-h}(0) = 0$ . Коэффициент ионизации в пленке SiO<sub>2</sub> при сильнополевой инжекции ( $\alpha$ ) для исследуемых МДП-структур определялся с использованием выражений, предложенных в [18, 19]. Моделирование проводилось с учетом ранее полученных нами экспериментальных данных [14] для МДП-структур, изготовленных на кремнии n-типа с термическими пленками SiO<sub>2</sub> с толщиной 100 нм и алюминиевым затвором [14, 20, 23]. Такие МДП-структуры изготавливаются промышленностью и совместимы с технологией изготовления интегральных микросхем серии CD4000. Данная технология используется для изготовления RADFET-сенсоров [7]. Сильнополевые воздействия рассматривались при положительной полярности напряжения на затворе, что соответствовало режиму инжекции электронов из кремниевой подложки. Для уменьшения вероятности пробоя подзатворного диэлектрика и удобства поддержания стабильного состояния сильнополевая инжекция электронов в диэлектрик обычно осуществляется в режиме протекания постоянного тока [20–24]. Параметры модели, входящие в выражения (2–7), были определены с учетом ранее проведенных исследований [14, 23] и полагались следующими:  $N_p = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ;  $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ;  $b_o = 3 \cdot 10^{-13} \text{ МВ}^3/\text{см}$ ;  $N_{it} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ;  $\lambda = 6 \cdot 10^{-8} \text{ рад}^{-1}$ ;  $\gamma_{e-h} = 0.3$ .

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обычно контроль величины поглощённой дозы при использовании МДП-сенсоров осуществляют по сдвигу порогового напряжения, определяемого выражением (3). Как видно из формулы (3), сдвиг порогового напряжения обусловлен накоплением положительного заряда дырок в диэлектрической пленке ( $p$ ) и заряда на поверхностных состояниях ( $n_{it}$ ). В соответствии с данными из литературы [11,13,17],  $n_{it}$  необходимо учитывать при малоинтенсивном излучении или при большой величине дозы. При малоинтенсивном радиационном воздействии, как правило,  $J_{rad} \ll J_{inj}$  и в этом случае изменение зарядового состояния МДП-структуры определяется сильнополевым воздействием. Следовательно, режим сильнополевой инжекции для МДП-сенсора целесообразно использовать, когда радиационное излучение обладает относительно сильной интенсивностью при которой величина  $J_{rad}$  становится соизмеримой или больше  $J_{inj}$ . В этом случае увеличение поверхностных состояний в основном определяется аннигиляцией захваченных в диэлектрике дырок при их взаимодействии с инжектированными электронами и описывается зависимостью (7).

На рис.2 показаны рассчитанные нами на основе предложенной модели с

учетом ранее полученных экспериментальных данных [14] временные зависимости плотности захваченных в диэлектрике дырок и величины поверхностных состояний при совместном воздействии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов.

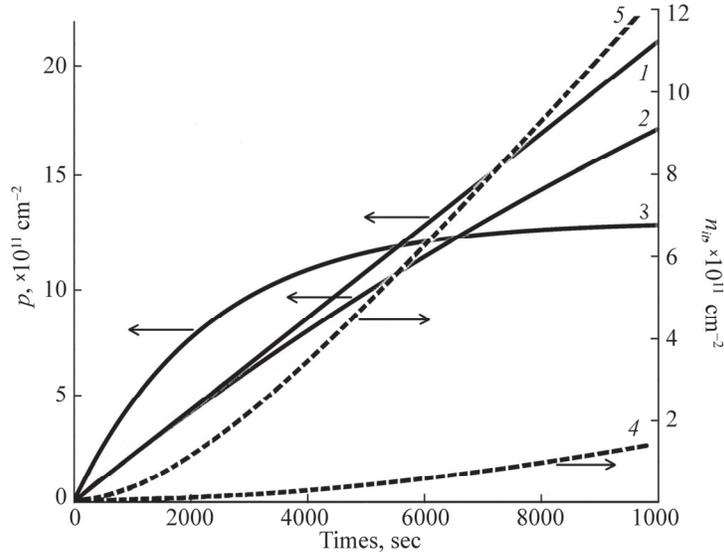


Рис.2. Плотность дырок ( $p$ ), накапливаемых в подзатворном диэлектрике МДП-структуры и количество поверхностных состояний ( $n_{it}$ ), генерируемых при аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами от времени воздействия при радиационном облучении с интенсивностью 10 рад/с (1, 2, 3, 4, 5) и одновременной сильнополевой инжекции электронов (2, 3, 4, 5) различной плотностью тока: 2, 4 –  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>; 3, 5 –  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>.

Кривые 2 и 3 на рис. 2 рассчитаны с использованием системы уравнений (2–7), а кривая 1 получена для электрического поля, соответствующего плотности инжекционного тока  $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>, с использованием выражения (1) без учета процессов, протекающих в сильных электрических полях. Как следует из рис. 2 (кривая 2) аннигиляция части положительного заряда в результате взаимодействия с инжектированными электронами дает более низкие значения плотности захваченных дырок по сравнению с расчетами, полученными с использованием формулы (1). При более высоких плотностях инжекционного тока (рис. 2, кривая 3) в начале воздействия плотность положительного заряда определяется не только радиационной, но и сильнополевой генерацией дырок и в этом случае плотность дырок выше, чем рассчитанная по формуле (1). При больших временах воздействия начинает сказываться процесс аннигиляции части захваченных дырок с инжектируемыми электронами, положительный заряд насыщается и становится существенно ниже полученной с использованием формулы (1).

Аннигиляция части положительного заряда в результате взаимодействия с инжектированными электронами также приводит к генерации поверхностных состояний (рис. 2, кривые 4 и 5). Как следует из рис. 2, кривая 5 при плотности инжекционного тока  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> величина вновь создаваемых поверхностных состояний может достигать значений, которые необходимо учитывать при определении сдвига порогового напряжения (3) и контроле поглощенной дозы RADFET-сенсором, работающим в сильнополевом инжекционном режиме. Другим важным направлением исследования МДП-структур при совместном воздействии ионизирующей радиации и сильнополевой инжекции электронов является возможность определения тока, вызываемого радиационным излучением, и как следствие, возможен контроль интенсивности излучения [14]. Наиболее удобный режим сильнополевой инжекции, используемый в МДП-сенсорах, заключается в поддержании постоянного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик [14, 18, 21, 25, 26]. В этом режиме существенно уменьшается вероятность пробоя подзатворного диэлектрика и может существенно повыситься ресурс работы прибора [25]. Возникновение в подзатворном диэлектрике МДП-структуры тока, обусловленного радиационной ионизацией, в режиме поддержания постоянного тока ( $J_0$ ), протекающего через диэлектрик, приводит к уменьшению инжекционного тока ( $J_{inj}$ ) в режиме сильнополевой инжекции или тока заряда емкости МДП-структуры ( $J_c$ ) в режиме перехода к сильнополевой инжекции. Величину изменения инжекционного или емкостного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик, можно определить по изменению временной зависимости напряжения, приложенного к МДП-структуре [14, 20–24].

На рис.3 показаны временные зависимости напряжения на кремниевой МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрик постоянного тока для случая, когда  $J_{rad} > J_0$  (кривые 3,3',3'',3''',4), и для случая, когда  $J_{rad} < J_0$  (кривые 7,8,9,9',8',7'). Результаты, показанные на рис.3, получены с использованием предложенной модели и хорошо согласуются с ранее полученными нами экспериментальными данными в работе [14]. Как видно из рис.3, возникновение в диэлектрической пленке тока в результате радиационной ионизации приводит к уменьшению или полному прекращению инжекционного тока и, как следствие, к снижению напряжения, падающего на диэлектрической пленке. Тогда, воспользовавшись формулой [24, 20–23]

$$J_0 = J_{inj} + J_{rad} + J_c, \quad (8)$$

из временной зависимости напряжения, приложенного к МДП-структуре, с учетом предложенной модели можно рассчитать  $J_{rad}$  и определить интенсивность радиационного излучения.

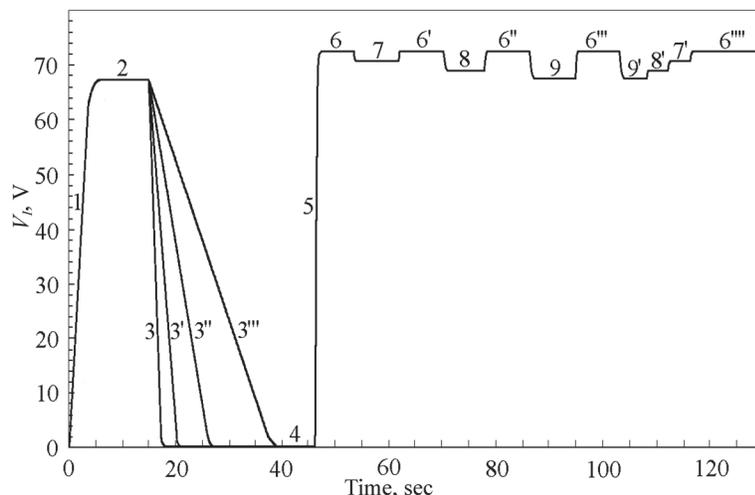


Рис.3. Временные зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрик постоянного тока ( $J_0$ ): 1,2,3,3',3'',3''',4 –  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> и 5,6,7,6',8,6'',9,6''',9',8',7',6'''' –  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> (на участках 1,2,5,6,6',6'',6''',6'''' облучение отсутствует; на участках 3',3'',3''',4,7,8,9,9',8',7' действует радиационное ионизирующее излучение, при этом на участках: 3 –  $J_{\text{rad}} = 10 \cdot J_0$ ; 3' –  $J_{\text{rad}} = 5 \cdot J_0$ ; 3'' –  $J_{\text{rad}} = 3 \cdot J_0$ ; 3''' –  $J_{\text{rad}} = 2 \cdot J_0$ ; 7,7' –  $J_{\text{rad}} = 0,5 \cdot J_0$ ; 8,8' –  $J_{\text{rad}} = 0,8 \cdot J_0$ ; 9,9' –  $J_{\text{rad}} = 0,9 \cdot J_0$ ).

В случае, когда величина  $J_{\text{rad}} > J_0$ , ионизационный ток определяется по скорости разряда емкости МДП-структуры (рис.3, кривые 3, 3', 3'', 3'''). Если  $J_{\text{rad}} < J_0$  (рис.3, кривые 7, 8, 9, 9', 8', 7'), то режим сильнополевой инжекции сохраняется, а напряжение на МДП-структуре уменьшается в соответствии со снижением инжекционного тока, что позволяет определить  $J_{\text{rad}}$  с использованием предложенной.

Как следует из рис.3, при сильнополевой инжекции электронов в режиме поддержания постоянного тока, протекающего через диэлектрик, ионизирующее радиационное воздействие может существенно снижать электрическое поле в диэлектрической пленке, что необходимо учитывать при эксплуатации МДП-сенсоров в этих режимах. Эксплуатация МДП-сенсора в режиме сильнополевой инжекции заряда в диэлектрик при поддержании протекания через диэлектрик постоянного тока позволяет контролировать интенсивность радиационных излучений [14], что существенно расширяет функциональные возможности МДП-сенсоров.

На рис. 4 представлены дозовые зависимости сдвига порогового напряжения МДП-сенсора ( $\Delta V_{\text{th}}$ ) при воздействии гамма- и альфа-излучений, рассчитанные на основе предложенной модели (сплошные линии), и полученные экспериментально (значки). Как видно из рис.4, в режиме сильнополевой

инъекции электронов сенсор имеет максимальную чувствительность, однако дозовый диапазон при этом может существенно уменьшиться. Уменьшение дозового диапазона МДП-сенсора обусловлено заполнением части дырочных ловушек положительным зарядом, сгенерированным сильнополевой инъекцией электронов, и ускорением деградационных процессов в подзатворном диэлектрике, связанных с сильнополевым воздействием. Аннигиляция части положительного заряда инжектированными электронами, как было показано выше, может приводить к повышению величины поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> а также ускорять деградационные процессы, связанные со структурной перестройкой границы раздела и диэлектрической пленки. Из рис.4 следует, что при воздействии альфа-излучения наблюдается более сильное возрастание чувствительности МДП-сенсора при переходе от режима, при котором к подзатворному диэлектрику приложено поле 0.5 МВ/см, к режиму сильнополевой инъекции, что связано, по-видимому, с более заметным возрастанием на этом участке выхода заряда по сравнению с воздействием гамма-излучения [27].

Таким образом, эксплуатация МДП-сенсоров в режимах сильнополевой инъекции заряда в диэлектрик требует дополнительного анализа зарядовых процессов, протекающих в диэлектрической пленке, и учета их влияния при обра-

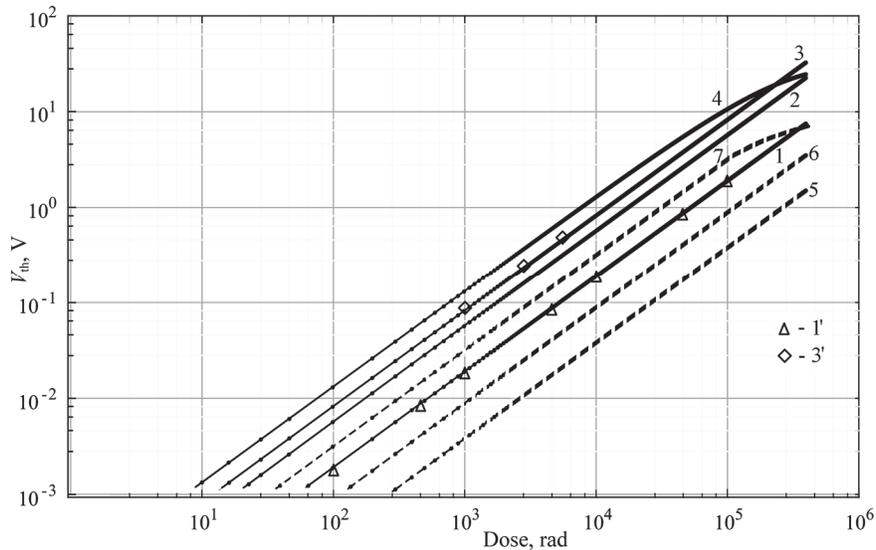


Рис.4. Зависимости сдвига порогового напряжения МДП сенсора ( $\Delta V_{th}$ ) от дозы гамма-излучения (1,1',2,3,3',4) и альфа-излучения (5,6,7): 1,1',5 – без смещения на затворе (1' – [5,14] экспериментальные данные); 2 – при положительном смещении на затворе ( $E = 0.2$  МВ/см); 3,6 – при положительном смещении на затворе ( $E = 0.5$  МВ/см, 3' – [7] экспериментальные данные); 4,7 – при положительном смещении на затворе в режиме сильнополевой инъекции при  $E = 7.28$  МВ/см.

ботке экспериментальных данных и выборов режимов работы сенсора [1, 11, 14, 28]. Для такого анализа может использоваться модель, предложенная в данной статье, с учетом параметров, определяемых для конкретных МДП-сенсоров.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены физические процессы, протекающие в МДП-структурах и сенсорах на их основе при совместном воздействии радиационных излучений и высокополевой инжекции электронов в диэлектрик. На основе полученных результатов предложена модель, описывающая изменение зарядового состояния МДП-структуры в условиях радиационной и высокополевой ионизации, протекающей в диэлектрической пленке. Основной особенностью предложенной модели является учет взаимодействия инжектированных электронов с дырками, генерируемыми радиационной и высокополевой ионизацией и затем захватываемых на ловушки в пленке SiO<sub>2</sub> у границы раздела с полупроводником, а также генерация поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, протекающая при аннигиляции части дырок в процессе их взаимодействия с инжектированными электронами.

Показано, что воздействие ионизирующего радиационного излучения на МДП-структуру, находящуюся в режиме высокополевой инжекции электронов постоянным током, может приводить к снижению напряжения, падающего на образце, за счет уменьшения или прекращения протекания инжекционного тока. В этом случае МДП-сенсор можно использовать для контроля интенсивности радиационного излучения. Ток, обусловленный радиационной ионизацией, можно определять с использованием предложенной модели.

Установлено, что режим высокополевой инжекции может существенно повысить дозовую чувствительность сенсоров поглощённой дозы на основе МДП-структур. Однако в режиме высокополевой инжекции электронов в диэлектрик может значительно снижаться ресурс работы и дозовый диапазон МДП-сенсора за счет протекания дополнительных зарядовых и деградационных процессов, вызванных высокополевым воздействием.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана из Министерства образования и науки РФ (проект №8.6779.2017/8.9).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Holmes-Siedle, L. Adams.** Radiat. Phys. Chem., **28**, 235 (1986).
2. **F. Ravotti.** IEEE Trans. Nucl. Sci., **65**, 1440 (2018).
3. **M.S. Andjelkovic, G.S. Ristic, A.B. Jaksic.** Meas. Sci. Technol. **26**, 025004 (2015).

4. **E. Yilmaz, A. Kahraman, A.M. McGarrigle, N. Vasovic, D. Yegen, A. Jaksic.** Applied Radiation and Isotopes, **127**, 156 (2017).
5. **M.M. Pejović.** Radiation Physics and Chemistry, **130**, 221 (2017).
6. **E. Pikhay, Y. Roizin, Y. Nemirovsky.** J. Low Power Electron, **7**, 20 (2017).
7. **O.F. Siebel, J.G. Pereira, R.S. Souza, F.J. Ramirez-Fernandez, M.C. Schneider, C. Galup-Montoro.** Radiation Measurements, **75**, 53 (2015).
8. **L.J. Asensio, M.A. Carvajal, J.A. Lopez-Villanueva, M. Vilches, A.M. Lallena, A.J. Palma.** Sensors and Actuators A, **125**, 288 (2006).
9. **J. Lipovetzky, A. Holmes-Siedle, M.G. Inza, S. Carbonetto, E. Redin, A. Faigon.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **59**, 3133 (2012).
10. **V.V. Andreev, G.G. Bondarenko, D.V. Andreev, D.M. Akhmelkin.** IEEE Proceedings. 2018 Moscow – Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), **1**, (2018).
11. **J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, D.M. Fleetwood, J.A. Felix, P.E. Dodd, P. Paillet, V. Ferlet-Cavrois.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **55**, 1833 (2008).
12. **D.M. Fleetwood.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **65**, 1465 (2018).
13. **T.R. Oldham, F.B. McLean.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **50**, 483 (2003).
14. **V.V. Andreev, V.M. Maslovsky, D.V. Andreev, A.A. Stolyarov.** Proceedings SPIE. International Conference on Micro- and Nanoelectronics 2018, **11022**, 1102207 (2019).
15. **В.Д. Попов.** Физика и техника полупроводников, **50**, 354 (2016).
16. **M.P. Baze, R.E. Plaag, A.H. Johnston.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **36**, 1858 (1989).
17. **M. Pejović Milić.** Facta universitatis, Series: Electronics and Energetics, **29**, 509 (2016).
18. **D. Arnold, E. Cartier, D.J. DiMaria.** Phys. Rev. B, **49**, 10278 (1994).
19. **D.J. DiMaria, E. Cartier, D.A. Buchanan.** J. Appl. Phys., **80**, 304 (1996).
20. **D.V. Andreev, G.G. Bondarenko, V.V. Andreev, V.M. Maslovsky, A.A. Stolyarov.** Acta Phys. Pol. A, **132**, 245 (2017).
21. **V.V. Andreev, G.G. Bondarenko, V.M. Maslovsky, A.A. Stolyarov, D.V. Andreev.** Phys. Status Solidi C, **12**, 299 (2015).
22. **V.V. Andreev, V.M. Maslovsky, D.V. Andreev, A.A. Stolyarov.** Proceedings SPIE. International Conference on Micro- and Nanoelectronics, **10224**, 1022429, (2016).
23. **V.V. Andreev, G.G. Bondarenko, V.M. Maslovsky, A.A. Stolyarov, D.V. Andreev.** Phys. Status Solidi C, **12**, 126 (2015).
24. **V.V. Andreev, G.G. Bondarenko, V.M. Maslovsky, A.A. Stolyarov.** Acta Phys. Pol. A, **125**, 1371 (2014).
25. **A.W. Strong, E.Y. Wu, R. Vollertsen, J. Suñé, G.L. Rosa, S.E. Rauch, T.D. Sullivan.** Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Hoboken, New Jersey, Wiley-IEEE Press, 2009.

26. **F. Palumbo, C. Wen, S. Lombardo, S. Pazos, F. Aguirre, M. Eizenberg, F. Hui, M. Lanza.** Adv. Funct. Mater., 1900657 (2019).
27. **A. Haran, M. Murat, J. Barak.** IEEE Trans. Nucl. Sci., **55**, 2098 (2008).
28. **А.А. Саакян.** Известия НАН Армении, Физика, **42**, 382 (2007).

#### USE OF MIS SENSORS OF RADIATION IN HIGH-FIELD ELECTRON INJECTION MODES

V.V. Andreev, G.G. Bondarenko, D.V. Andreev, A.A. Stolyarov

A model is proposed that describes the change in the charge state of metal-insulator-semiconductor (MIS) structures and sensors made from it's under the conditions of the simultaneous effect of radiation ionization and high-field injection of electrons from a semiconductor. The proposed model takes into account the interaction of injected electrons with holes generated by radiation and high-field ionization and trapped at the interface of the SiO<sub>2</sub> film with a semiconductor, as well as the generation of surface states during the annihilation of part of holes during their interaction with injected electrons. It is shown that the MIS sensor, where the high-field injection of electrons into the dielectric film takes place, can be used to control the intensity of radiation by determining the radiation ionization current from the time dependence of the voltage incident on the sensor using the proposed model. It has been established that in the high-field electron injection mode, a significant increase in the dose sensitivity of MIS sensors is possible, but at the same time, the operating time and dose range of the MIS sensor can be significantly reduced.