

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В МДП-СЕНСОРАХ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Д.В. Андреев<sup>1</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2</sup>, А.А. Столяров<sup>1</sup>, М.С. Васютин<sup>1</sup>,  
А.В. Романов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал; <sup>2</sup> Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»  
E-mail: [bondarenko\\_gg@rambler.ru](mailto:bondarenko_gg@rambler.ru)

Разделение изменения зарядового состояния МДП-структуры, обусловленное воздействием радиации и сильного электрического поля, является важным аспектом при контроле ионизирующих излучений сенсорами на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1,2], находящимися в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Такое разделение позволяет существенно повысить точность и достоверность контроля ионизирующих излучений, а также выбрать оптимальные режимы работы сенсоров. При анализе результатов контроля с помощью МДП сенсоров особенно сложно выделить увеличение плотности поверхностных состояний, обусловленное ионизирующим воздействием. Одним из возможных путей решения этой проблемы является определение плотности поверхностных состояний, сгенерированных сильнополевой инжекцией на основе модели и последующий учет этого явления при контроле радиационных воздействий.

Данная работа посвящена моделированию и учету процесса генерации поверхностных состояний в МДП сенсорах радиационных излучений, работающих в режиме протекания постоянного инжекционного тока при сильнополевой инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму.

При протекании постоянного инжекционного тока через плёнку двуокиси кремния МДП-структуры помимо сильнополевой генерации положительного заряда и захвата электронов на исходные ловушки, происходит генерация электронных ловушек (даже при не очень сильных электрических полях) с постоянным коэффициентом генерации [3-6]. Считалось, что процесс генерации электронных ловушек равномерен по всему объему окисла.

Для учёта накопления положительного заряда, формирующегося вследствие ударной ионизации, была применена модель, предложенная в [3-6]. Согласно этой модели рекомбинация захваченных дырок со свободными электронами, происходящая около кремниевой подложки, приводит к генерации поверхностных состояний на границе Si-SiO<sub>2</sub>. Т.к. коэффициент электронно-дырочной рекомбинации для постоянного токового воздействия эквивалентен  $\frac{J_n \sigma_n p}{q}$  (см. уравнение 1), то можно было бы ожидать, что коэффициент генерации поверхностных состояний пропорционален положительному заряду  $p$ . Качественно, такая зависимость между

захватываемыми дырками и генерацией поверхностных состояний действительно существует. Однако при возрастании сложности вычислений может меняться и вид зависимости, поскольку эффективность преобразования (число поверхностных состояний, генерируемых за рекомбинацию) может изменяться как минимум на целых три порядка величины, завися от вида обработки и выбранной модели. Кроме того, присутствие самой захваченной дырки вызывает напоминающий поверхностные состояния отклик в C-V характеристиках. Помимо этого, существует также процесс генерации поверхностных состояний за счёт продиффундировавшего атомарного водорода, который может приводить к генерации поверхностных состояний и изменению зарядового состояния МДП-структур.

В основу модели были положены следующие уравнения:

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO<sub>2</sub>

$$q \frac{dp}{dt} = J_n (m-1) \sigma_p (N_p - p) - J_n \sigma_n p \quad (1)$$

- уравнение для коэффициента генерации поверхностных состояний

$$\frac{dn_{it}^{e-h}}{dt} = \gamma_{e-h} \frac{J_n}{q} \sigma_n p \quad (2)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_n = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (3)$$

- уравнение нейтральности заряда

$$Q_0 = Q_c + Q_{inj} \quad (4)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $p$  – плотность дырок, накапливаемых в SiO<sub>2</sub>;  $t$  – время;  $J_n$  – плотность тока инжекции;  $(m-1)$  – коэффициент генерации дырок ( $m$  – коэффициент умножения электронов);  $N_p$  и  $\sigma_p$  – плотности и сечения захвата дырочных ловушек в SiO<sub>2</sub>;  $\sigma_n$  – сечения захвата инжектированных электронов заполненными дырочными ловушками;  $n_{it}^{e-h}$  – коэффициент генерации поверхностных состояний;  $\gamma_{e-h}$  является вероятностью, с которой будет происходить генерация поверхностных состояний через электронно-дырочную рекомбинацию;  $A = 1,54 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{m_0}{m^*} \cdot \varphi_B^{-1}$  [A/B<sup>2</sup>]

и  $B = 6,83 \cdot 10^7 \cdot \frac{m_0}{m^*} \cdot \varphi_B^{3/2}$  [В/см] – постоянные туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму,  $E$  – напряжённость катодного электрического поля;  $Q_c$  – заряд, накапливаемый ёмкостью МДП-структуры ( $Q_c = C_{mos} \cdot V_I(t)$ );  $C_{mos}$  – ёмкость структуры;  $V_I(t)$  – временная зависимость падающего на образце напряжения;  $Q_0$  – заряд, подводимый к образцу ( $Q_0 = J_0 \cdot t$ ) импульсом постоянного тока плотностью  $J_0$ ;  $Q_{inj}$  – заряд, инжектированный в диэлектрик ( $Q_{inj} = J_n \cdot t$ ).

Принимаем  $N_p = 1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>;  $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>;  $\gamma_{e-h} = 0,3$ .

Система (1-4) решалась при следующих начальных условиях:  $p(0) = n_{it}^{e-h}(0) = 0$ . В выражении (1)  $\sigma_n$  имеет полевую зависимость, которая имеет вид:  $\sigma_n = b_0 \cdot E^{-3}$ , где  $b_0$  представляет собой параметр модели ( $b_0 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ MB}^3/\text{см}$ ).

Дифференциальное уравнение (1) описывает плотность дырок, накапливаемых в  $\text{SiO}_2$ . Уравнение (2) позволяет определить коэффициент генерации поверхностных состояний через электронно-дырочную рекомбинацию. Уравнение (3) даёт возможность вычислить плотность инжекционного тока. Выражение (4) представляет из себя уравнение нейтральности заряда.

Уравнение 2 решалось методом Рунге-Кутты-Фельберга 4-5-ого порядка.

На основании моделирования, проведённого в СКМ (системе компьютерной математики) Maple 15, была получена зависимость заряда на поверхностных состояниях от времени при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик в отсутствие (кривые 2 и 3) и наличии облучения  $\alpha$ -частицами [7] (кривая 1) МДП-структуры.

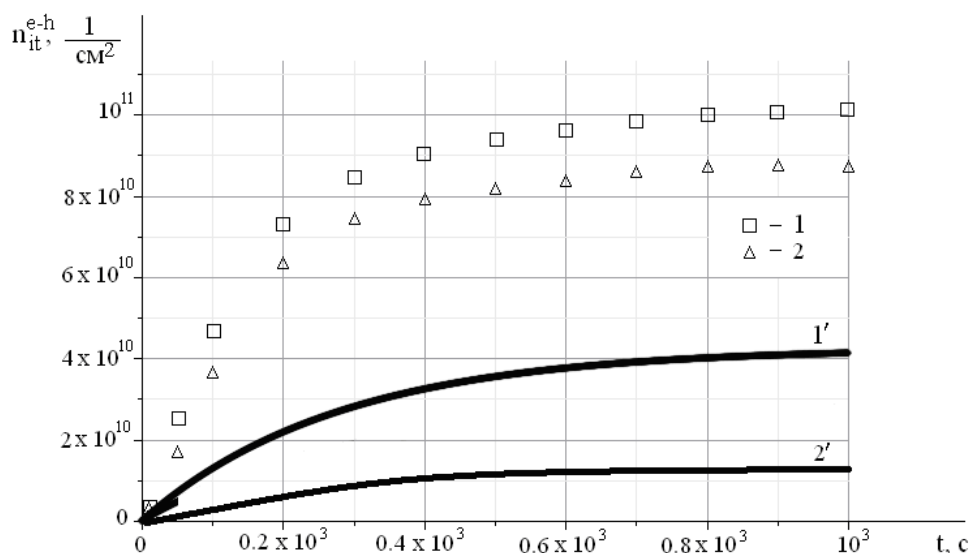


Рис. 1. Зависимость заряда на поверхностных состояниях от времени при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик в отсутствие (кривые 1' и 2') и в процессе облучения  $\alpha$ -частицами (кривая 1) МДП-структуры. Кривые 1 и 1' соответствует плотности инжекционного тока  $10 \text{ мкА/см}^2$ , а кривая 2 и 2' -  $1 \text{ мкА/см}^2$

Как видно из рис. 1, с увеличением напряженности электрического поля (более высокий инжекционный ток, кривые 1 и 1') возрастает коэффициент генерации поверхностных состояний. Для повышения достоверности контроля ионизирующих излучений МДП сенсор желательно использовать в режиме минимального изменения зарядового состояния и в частности плотности поверхностных состояний. В тех случаях, когда это невозможно, результаты контроля ионизирующих излучений необходимо корректировать с

использованием результатов расчета сильнополевой составляющей генерации поверхностных на основе описанной модели.

Таким образом, в работе предложен способ учета процесса генерации поверхностных состояний в МДП сенсорах радиационных излучений, работающих в режиме протекания постоянного инжекционного тока при сильнополевой инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму. Предложена модель, описывающая сильнополевую генерацию поверхностных состояний в МДП-структурах, сформированных на основе термической пленки двуокиси кремния. Определены параметры модели и проведено моделирование, учитывающие генерацию поверхностных состояний при контроле  $\alpha$ -частиц с использованием МДП сенсоров.

1. Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин М.С., Михальков А.М. Активный чувствительный элемент сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур с наноразмерными диэлектрическими слоями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2010. С.118-127.
2. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры с наноразмерными диэлектрическими пленками // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 5. С.18-25.
3. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide // Phys. Rev. B. 1994. Vol.49. № 15. P.10278-10297.
4. Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А. Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.
5. Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Зарядовая нестабильность МДП-структур с диэлектрическими слоями двуокись кремния - фосфорно-силикатное стекло в условиях высокополевой туннельной инжекции // Известия вузов. Физика. 1999. № 10. С. 59-63.
6. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films. 2006 V.515. 670-673.
7. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Лычагин А.А., Столяров А.А., Ульяненко С.Е. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 19-23.

---

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы ГК №16.740.11.0151, а также при финансовой поддержке РФФИ и администрации Калужской области (грант № 12-02-97533-р\_центр\_а.).