

# ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ МОП-СТРУКТУР ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Д.В. Андреев<sup>1</sup>, С.А. Корнев<sup>1</sup>, В.В. Андреев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия, e-mail: dmitrii\_andreev@bmstu.ru

## Аннотация

В данной работе проведено исследование изменения зарядового состояния МОП-структур с термическими пленками диоксида кремния при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов проводимой в режиме поддержания на структуре постоянного напряжения. В качестве ионизирующего излучения использовались  $\alpha$ -частицы, протоны и гамма-излучение [1,2]. Изменение зарядового состояния МОП-структур контролировалось по временной зависимости инжекционного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик.

## Экспериментальные образцы

Исследуемые МДП-конденсаторы формировались на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . Диоксид кремния толщиной 20÷100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по напыленной алюминиевой пленке. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С [1].

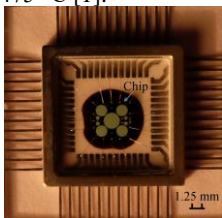


Рис.1. Фотография полупроводникового кристалла исследуемых МДП-структур (а) и образцов, разваренных в корпус ИС (б)

Сильнополевая туннельная инжекция электронов проводилась при положительной полярности алюминиевого электрода на экспериментальной установке, основанной на прецизионном генераторе/измерителе тока/напряжения PXIe-4135, который является модулем серии PXI от компании National Instruments.

Для исследования влияния  $\alpha$ -частиц на МДП-сенсоры, образцы подвергались воздействию излучения источника  $^{239}\text{Pu}$ . Для облучения МДП-структур гамма квантами использовался источник  $\text{Co}^{60}$ .

## Выводы

Исследованы особенности накопления радиационно-индуцированного положительного заряда в пленке подзатворного диэлектрика при сильнополевой инжекции электронов в режиме постоянного напряжения. Определены условия при которых можно использовать данный режим инжекции электронов для повышения дозовой чувствительности МОП и RADFET сенсоров радиационных излучений. Скорректированы модельные представления о физических процессах протекающих в подзатворном диэлектрике и на границах раздела МОП-структур при одновременном воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов в режиме постоянного напряжения. Показано, что поглощенную дозу радиационного излучения при постоянном напряжении на образце можно определять из изменений плотности тока сильнополевой инжекции электронов.

## Модель

Моделирование зарядовых процессов, протекающих в МДП-структурах при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов проводимой в режиме поддержания на структуре постоянного напряжения, осуществлялось на основе следующей системы уравнений:

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма:

$$J_{inj} = AE_c^2 \exp\left(-\frac{B}{E_c}\right),$$

- уравнение для плотности тока, создаваемого ионизирующим излучением:

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

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке  $\text{SiO}_2$  при сильнополевой инжекции и радиационном облучении:

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

- уравнение описывающее изменение катодного поля в подзатворном диэлектрике в результате накопления в нем положительного заряда:

$$\Delta E_c = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left[ p \left( 1 - \frac{x_p}{d_{ox}} \right) \right],$$

где  $q$  – заряд электрона;  $\epsilon \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $p$  – плотность дырок, накапливаемых в  $\text{SiO}_2$ ;  $d_{ox}$  – толщина  $\text{SiO}_2$ ;  $x_p$  – положение центра (относительно границы Si-SiO<sub>2</sub>) положительного заряда;  $\alpha$  – коэффициент ионизации в пленке  $\text{SiO}_2$  при сильнополевой инжекции;  $\sigma_{ep}$  – сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов (при аннигиляции части положительного заряда);  $Y(E)$  – выход заряда при облучении (доля дырок, избежавших рекомбинации);  $K_g$  – количество электронно-дырочных пар на единицу дозы и объема  $\text{SiO}_2$  (8·10<sup>12</sup> см<sup>3</sup>·рад<sup>-1</sup> ( $\text{SiO}_2$ ) пар);  $I_{rad}$  – интенсивность облучения [1,3,4].

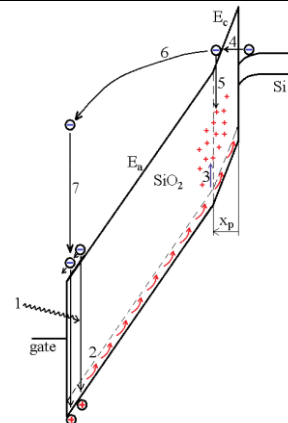


Рис. 2. Зонная диаграмма МДП структуры при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов: 1 – создание электронно-дырочных пар радиацией; 2 – транспорт дырок; 3 – захват дырок на ловушки; 4 – сильнополевая инжекция электронов; 5 – аннигиляция части дырок инжектированными электронами; 6 – транспорт и разогрев инжектированных электронов; 7 – термализация горячих электронов с созданием дырки.  $E = E_c + E_a = \text{const}$ .

## Результаты

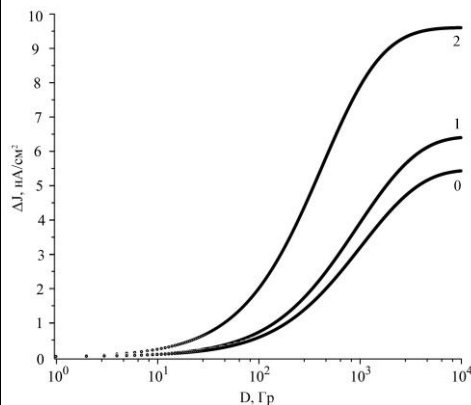


Рис. 3. Дозовая зависимости сдвига плотности инжекционного тока при поддержании постоянного напряжения на МДП сенсоре, обеспечивающего начальную плотность тока 10 нА/см<sup>2</sup> в отсутствии радиационного воздействия (кривая 0) и при интенсивности радиационного излучения 0,1 Гр (кривая 2) и 1 Гр (кривая 3).

## Литература

[1] Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A. Use of High-Field Electron Injection into Dielectrics to Enhance Functional Capabilities of Radiation MOS Sensors // Sensors. 2020. V.20. Is.8. P.2382(1-11).  
[2] Pejović M.M. Application of p-channel power VDMOSFET as a high radiation dose sensor// IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. 62 (2015) P.1905-1910.  
[3] Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A. Charge effects in dielectric films of MIS structures being under high-field injection of electrons at ionizing radiation// Proc. SPIE. International Conference on Micro and Nano-Electronics 2018, 11022 (2019) 1102207(1-7).  
[4] Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В., Масловский В.М., Столяров А.А. Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур при одновременном воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов// Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. №3. С. 53-57.