

## Аннотация

В данной работе изучены процессы накопления и стирания радиационно-индуцированного заряда в структурах металл-оксид-полупроводник (МОП). Накопление радиационно-индуцированного заряда изучалось при облучении структур  $\alpha$ -частицами, протонами и гамма-излучением [1-4]. Исследовано влияние сильнополевой инжекции электронов на появление и последующую эволюцию радиационно-индуцированных зарядов и дефектов в тонких диэлектриках МОП-структур. Определены режимы сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, повышающие его дозовую чувствительность, а также режимы, позволяющие стирать большую часть радиационно-индуцированного положительного заряда при минимальной деградации оксида и его границы с полупроводником.

## Экспериментальные образцы и методы

В качестве исследуемых образцов использовались МОП-структуры, изготовленные на кремнии n-типа с термическими пленками SiO<sub>2</sub> толщиной 100 нм и алюминиевым затвором [1,3,4]. Диоксид кремния толщиной 100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °С с добавлением 3% HCl. Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по алюминиевой пленке, напыленной магнетронным методом. Такие МДП-структуры изготавливались промышленным способом и были совместимы с технологией изготовления интегральных микросхем серии CD4000. Данная технология также используется для изготовления RADFET сенсоров [1,2].

Сильнополевая туннельная инжекция электронов проводилась в режиме протекания постоянного тока при положительной полярности металлического электрода с использованием экспериментальной установки, реализованной с использованием прецизионного генератора/измерителя тока/напряжения PXIe-4135, являющегося модулем серии PXI от National Instruments. Основным параметром, характеризующим изменение зарядового состояния диэлектрической пленки МОП структуры, был сдвиг напряжения на образце во время инжекции ( $\Delta V_1$ ), определявшийся при постоянной величине инжекционного тока [1,3,4].

## Выводы

Предложена модель, описывающая процесс накопления и стирания радиационно-индуцированного положительного заряда в пленке оксида, в том числе и при сильнополевой инжекции электронов. Проведенные исследования зарядовых процессов, протекающих в термических пленках диоксида кремния МОП-структур при воздействии ионизирующих излучений и сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов, представляет большой интерес как с точки зрения эксплуатации МОП приборов, так и при разработке МОП сенсоров радиационных излучений. Установлено, что для аннигиляции одной дырки радиационно-индуцированного заряда необходимо инжектировать в позатворный диэлектрик  $(0.5 - 2) \times 10^4$  электронов, при этом величина электрического поля практически не влияет на процесс стирания радиационно-индуцированного заряда.

## Модель

Для определения плотности дырок, накапливаемых в подзатворном диэлектрике при совместном действии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов, а также стирания радиационно-индуцированного заряда сильнополевой инжекцией использовалось уравнение [3,4]:

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

где для определения плотности тока Фаулера-Нордгейма используется выражение:

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

а для нахождения плотности тока, создаваемого ионизирующим излучением применяется выражение [1,3]:

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

уравнение сдвига порогового напряжения МДП-структуры характеризующее накопление и стирание радиационно-индуцированного заряда имело следующий вид:

$$\Delta V_T = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left[ p(d_{ox} - x_p) + n_{it}^{e-h} d_{ox} \right],$$

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;  $I_{rad}$  – интенсивность облучения;  $q$  – заряд электрона;  $d_{ox}$  – толщина оксида;  $A = 1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0/m^* \cdot \phi_B^{-1}$  [A/B<sup>2</sup>] и  $B = 6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0/m^* \cdot \phi_B^{3/2}$  [В/см] – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции;  $m_0$  и  $m^*$  – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике;  $\phi_B$  – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела;  $\epsilon \epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $x_p$  – положение центроида (относительно границы Si-SiO<sub>2</sub>) радиационно-индуцированного положительного заряда захваченных в SiO<sub>2</sub> дырок. При стирании положительного заряда считалось, что  $J_{rad} = 0$ .

## Результаты

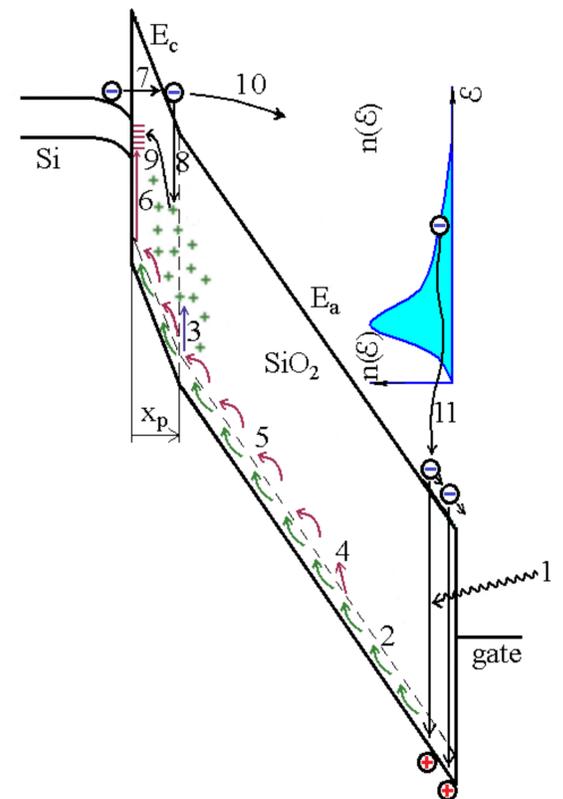


Рис. 1. Зонная диаграмма МДП-структуры, показывающие основные зарядовые процессы, протекающие в подзатворном диэлектрике при совместном действии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов, а также стирания радиационно-индуцированного заряда сильнополевой инжекцией электронов

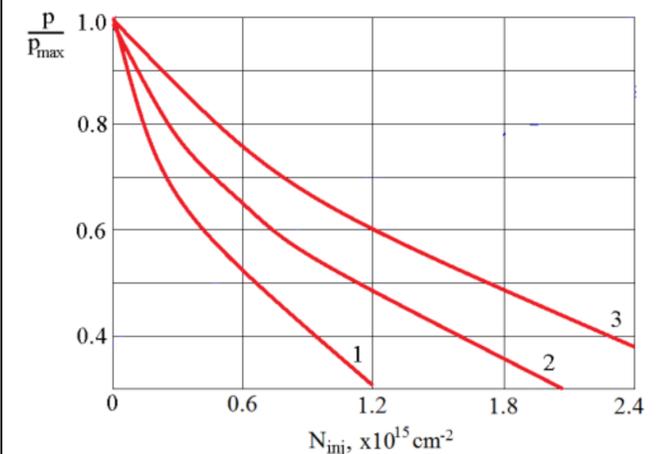


Рис. 2. Зависимость относительной плотности дырок от плотности инжектированных электронов при стирании радиационно-индуцированного заряда для различной плотности дырок накопленной при облучении протонами: 1 –  $0.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ; 2 –  $1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ; 3 –  $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

## 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] 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.
- [4] Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Андреев В.В. Изменение зарядового состояния МОП-структур с радиационно-индуцированным зарядом при сильнополевой инжекции электронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. №1. С. 55-60.