

# ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ МОП-СТРУКТУР С РАДИАЦИОННО- ИНДУЦИРОВАННЫМ ЗАРЯДОМ ПРИ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Д.В. Андреев<sup>1</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2</sup>, В.В. Андреев<sup>1</sup>, А.А. Столяров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

## Аннотация

Изучено влияние режимов сильнополевой инжекции электронов на изменение зарядового состояния и дефектность МОП структуры после радиационного облучения. Рассматриваются вопросы стирания радиационно-индуцированного положительного заряда, накопленного в результате радиационного облучения, путем последующей сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов в подзатворный диэлектрик [1-4]. Показано, что для стирания положительного заряда необходимо использовать сильнополевую туннельную инжекцию электронов при электрических полях, не вызывающих генерацию дырок. Установлено, что стирание радиационно-индуцированного положительного заряда в пленке SiO<sub>2</sub> МОП структур, а также генерация новых поверхностных состояний, в основном определяются величиной заряда, инжектированного в диэлектрик.

## Экспериментальные образцы

Исследуемые МДП-конденсаторы формировались на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией <100>. 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 напыленной алюминиевой пленке. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °С [1,3,4].

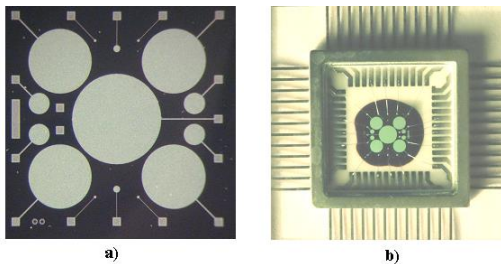


Рис.1. Фотографии полупроводникового кристалла исследуемых МОП-структур (а) и образцов, разваренных в корпус ИС (б)

## Модель

Для определения изменения плотности радиационно-индуцированных дырок, в процессе сильнополевой инжекции электронов, использовалось скорректированное [3,4] уравнение:

$$q \frac{dp}{dt} = -J_{inj} \cdot \sigma_{ep} \cdot p,$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма:

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

- уравнение для количества поверхностных состояний, генерируемых при аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами

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

- уравнение сдвига порогового напряжения МДП-структуры при инжекции электронов из кремния в режиме протекания постоянного тока можно определить по формуле:

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

где  $\sigma_{ep}$  – сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов (при аннигиляции части положительного заряда), имеющее полевую зависимость  $\sigma_{ep} = b_0 E^{-3}$ , где  $b_0$  – параметр модели;  $N_t$  и  $\sigma_t$  – плотность и сечение захвата электронных ловушек в объеме диэлектрической пленки;  $q$  – заряд электрона;  $d_{ox}$  – толщина оксида;  $A = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{м} \cdot \text{фв}^{-1} [\text{А/В}^2]$  и  $B = 6,83 \cdot 10^7 \text{ м} \cdot \text{м} \cdot \text{фв}^{3/2} [\text{В/см}]$  – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции;  $m_0$  и  $m^*$  – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике;  $\text{фв}$  – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $x_p$  и  $x_n$  – положение центроидов (относительно границы Si-SiO<sub>2</sub>) положительного заряда захваченных в SiO<sub>2</sub> дырок и захваченных электронов, соответственно.

## Результаты

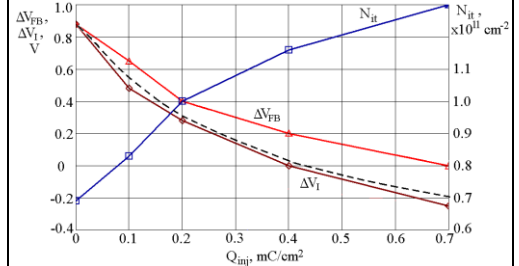


Рис. 2. Изменение напряжения  $\Delta V_1$  на МДП-структуре, содержащей радиационно-индуцированный положительный заряд при последующей сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в режиме протекания постоянного тока  $J_{inj} = 1 \text{ мкА/см}^2$  (пунктирной линией показана теоретически рассчитанная кривая) и изменение напряжения плоских зон в процессе инжекции, а также количество поверхностных состояний от величины инжектированного заряда

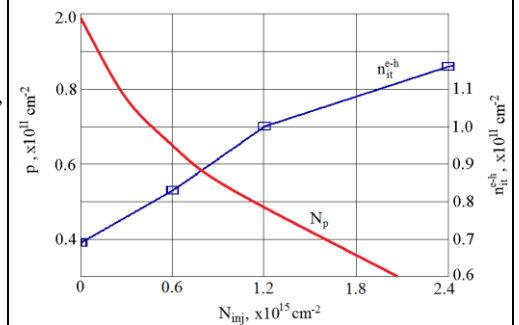


Рис. 3. Плотность дырок, захваченных в подзатворном диэлектрике и количество вновь созданных поверхностных состояний от плотности инжектированных электронов

Из данных приведенных на рис. 3 видно, что для генерации одной поверхностной ловушки необходима аннигиляция 4 – 6 дырок (параметр модели  $\gamma_{e-h}$  лежал в диапазоне 0.15-0.25). Как видно из рис. 3 количество вновь созданных поверхностных состояний на участке, когда дырочный заряд имеет существенную величину практически совпадает экспериментальными данными приведенными на рис. 2.

## Выводы

Показано, что для стирания радиационно-индуцированного положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO<sub>2</sub> МОП структур, после радиационного воздействия желательно использовать сильнополевую туннельную инжекцию электронов при электрических полях, не вызывающих генерацию дырок. Установлено, что при аннигиляции захваченных в SiO<sub>2</sub> дырок в результате взаимодействия с инжектированными электронами, наблюдается существенное увеличение количества поверхностных состояний, значительно превышающих количество поверхностных состояний, возникающих при отжиге радиационно-индуцированного заряда при комнатной температуре. Предложена модель, описывающая процесс аннигиляции радиационно-индуцированного положительного заряда при послерадиационном взаимодействии с инжектированными электронами.

## 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. Рентгеновский, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. №3. С. 53-57.