

Аннотация

В работе проведено исследование влияния режимов термического и инжекционного отжига радиационно-индуцированного заряда в структурах металл-оксид-полупроводник (МОП) структур. Для создания радиационно-индуцированного заряда МОП-структуры облучались α -частицами, протонами и гамма-излучением [1]. В результате облучения формировался объемный положительный заряд в подзатворном диэлектрике структур и заряд на поверхностных ловушках на границе раздела полупроводник-диэлектрик. Радиационно-индуцированный заряд, как правило, является основным фактором деградации МОП приборов, а также основной информационной величиной в МОП сенсорах радиационных излучений [1].

Экспериментальные образцы

Использовались два вида МОП сенсоров радиационных излучений. Первый вид сенсоров был реализован на основе МОП конденсаторов различных площадей, изготовленных на одном полупроводниковом кристалле. Второй вид сенсоров представлял собой р-канальный МДП транзистор (RADFET сенсор) с длиной канала 6 мкм и шириной 700 мкм. Оба вида сенсоров изготавливались промышленным способом по технологии интегральных микросхем серии CD4000 [2]. Подзатворный диэлектрик представлял собой плёнку SiO₂ толщиной 90 нм, сформированную термическим окислением кремния при температуре 1000 °С в атмосфере сухого кислорода с добавлением 3 % газообразного HCl.

Для исследования влияния α -частиц на МДП-сенсоры, образцы подвергались воздействию излучения источника ²³⁹Pu. Для облучения МДП-структур гамма квантами использовался источник Co⁶⁰.

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

Выводы

Показано, что после формирования радиационно-индуцированного заряда большая его часть может быть стерта путем проведения термического отжига образцов и/или сильнополевой инжекцией электронов в подзатворный диэлектрик. При сильнополевой инжекции электронов часть электронов взаимодействует с радиационно-индуцированным положительным зарядом приводя к его аннигиляции, однако при этом может увеличиваться заряд на поверхностных ловушках. Предложена модель, описывающая процесс отжига радиационно-индуцированного положительного заряда. Установлено, что накопление радиационно-индуцированного положительного заряда в подзатворном диэлектрике МОП приборов при сильнополевой инжекции электронов в режиме поддержания постоянного напряжения на структуре может приводить к увеличению плотности инжекционного тока на несколько порядков по сравнению с первоначальным значением.

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 SiO₂ 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:

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

- уравнение для общего поля

$$E(t) = E_c(t) + E_a(t)$$

где q – заряд электрона; $\epsilon \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO₂; d_{ox} – толщина SiO₂; x_p – положение центроида (относительно границы Si-SiO₂) положительного заряда; α – коэффициент ионизации в пленке SiO₂ при сильнополевой инжекции; σ_{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 SiO₂ ($8 \cdot 10^{12}$ см⁻³·рад⁻¹ (SiO₂) пар); I_{rad} – интенсивность облучения [1,3,4].

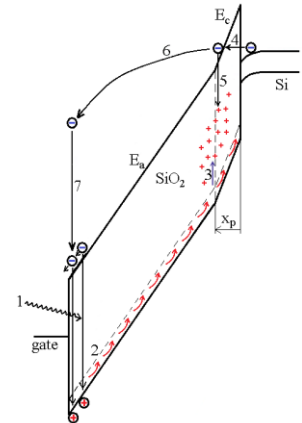


Рис. 2. Зонная диаграмма МДП структуры при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов: 1 – создание электронно-дырочных пар радиацией; 2 – транспорт дырок; 3 – захват дырок на ловушки; 4 – сильнополевая инжекция электронов; 5 – аннигиляция части дырок инжектированными электронами; 6 –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

Результаты

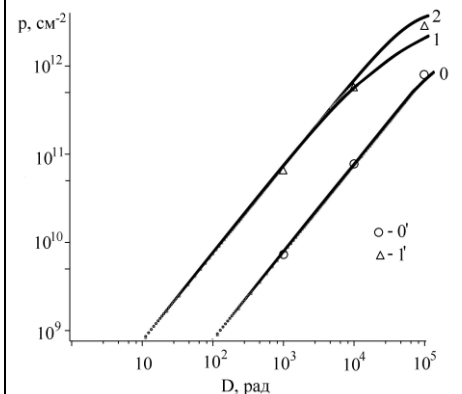


Рис. 3. Теоретические (0, 1, 2) и экспериментальные (0', 1') дозовые зависимости плотности радиационно-индуцированного положительного заряда, накапливаемого в подзатворном диэлектрике МОП структуры при облучении альфа-частицами: 0, 0' – при отсутствии напряжения на затворе; 1, 1' и 2 – при напряжении на затворе 65,5 В и различной интенсивности излучения (1, 1' – 10 рад/с; 2 – 100 рад/с).

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.