

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА НАКОПЛЕНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ В ПОДЗАТВОРНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ МОП-СТРУКТУР

Д.В. Андреев¹, Г.Г. Бондаренко², В.В. Андреев¹, А.А. Столяров¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Аннотация

При использовании полупроводниковых приборов и сенсоров радиационных излучений на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) [1-4] большой интерес представляет исследование радиационной ионизации в таких структурах в сильных электрических полях, приводящих к инжекции носителей заряда в диэлектрическую пленку, поскольку сильные электрические поля стимулируют процессы ионизации и ускоряют перемещение зарядов в объеме диэлектрической пленки. В работе проведено исследование изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик, при радиационных воздействиях α -частиц, электронного и гамма-излучения. На основе полученных экспериментальных данных предложено модельное описание изменения зарядового состояния МДП-структур при совместном воздействии сильных электрических полей и радиационных воздействий.

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 [3].

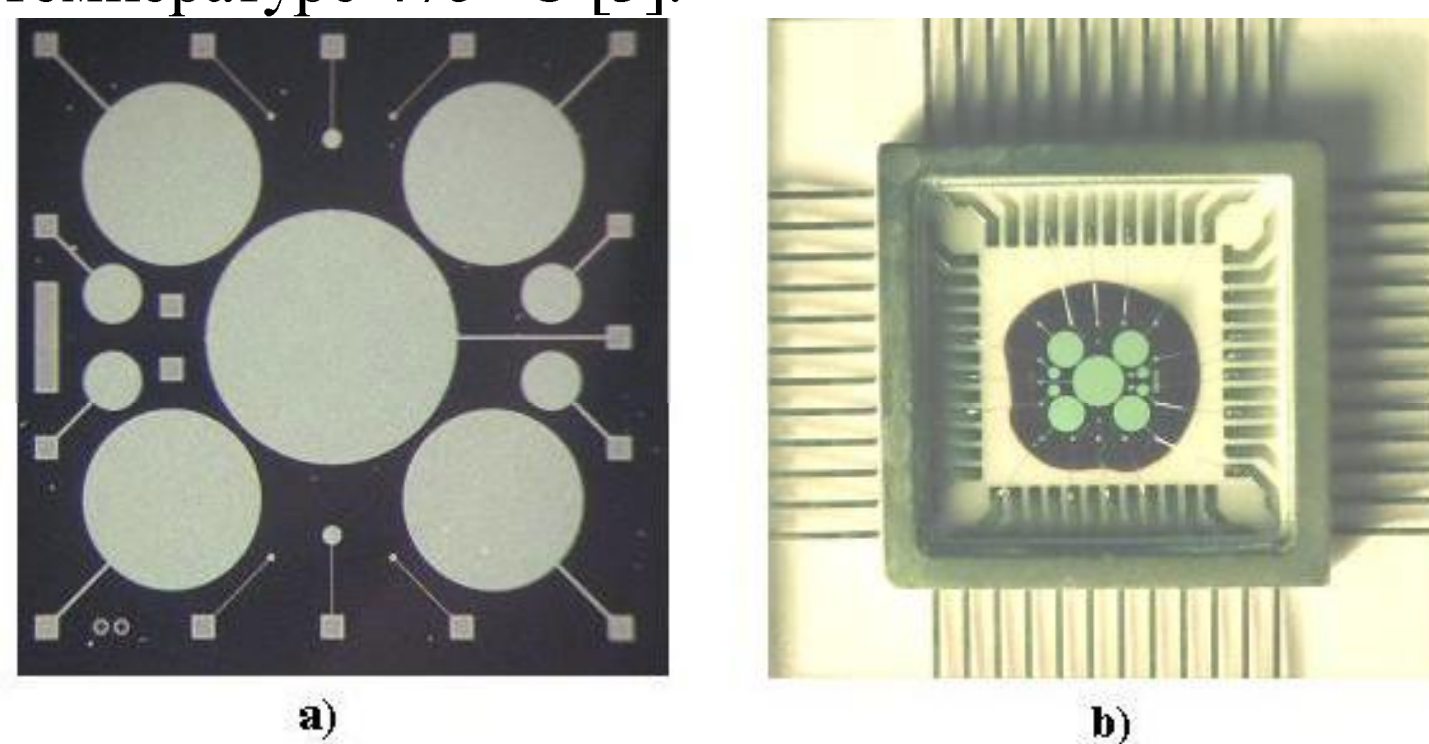


Рис.1. Фотографии полупроводникового кристалла исследуемых МДП-структур (а) и образцов, разваренных в корпус ИС (б)

Модель

Моделирование зарядовых процессов, протекающих в МДП-структурах при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов постоянным током и радиационном облучении, осуществлялось на основе следующей системы уравнений:

- уравнение сдвига порогового напряжения МДП сенсора в результате изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика:

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

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма:

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

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

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

где q – заряд электрона; $\epsilon \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO₂; d_{ox} – толщина SiO₂; x_p – положение центра (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; γ_{e-h} – вероятность создания поверхностного состояния электронно-дырочной рекомбинацией.

Результаты

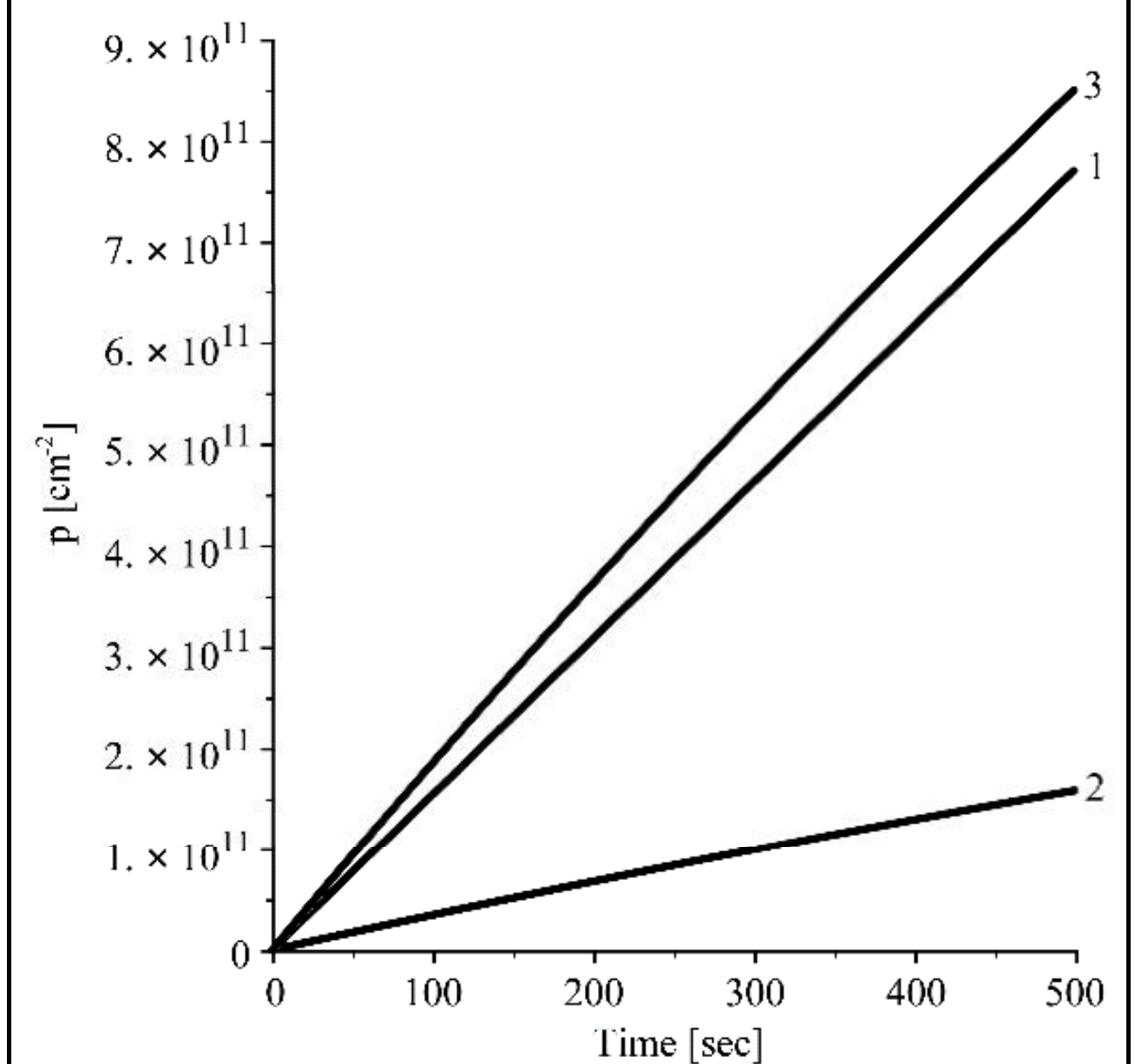


Рис. 2. Плотность дырок, накапливаемых в подзатворном диэлектрике МДП-структур от времени воздействия при радиационном облучении с интенсивностью 100 рад/с (1,3) и сильнополевой инжекции электронов плотностью тока 10^{-7} А/см² (2,3)

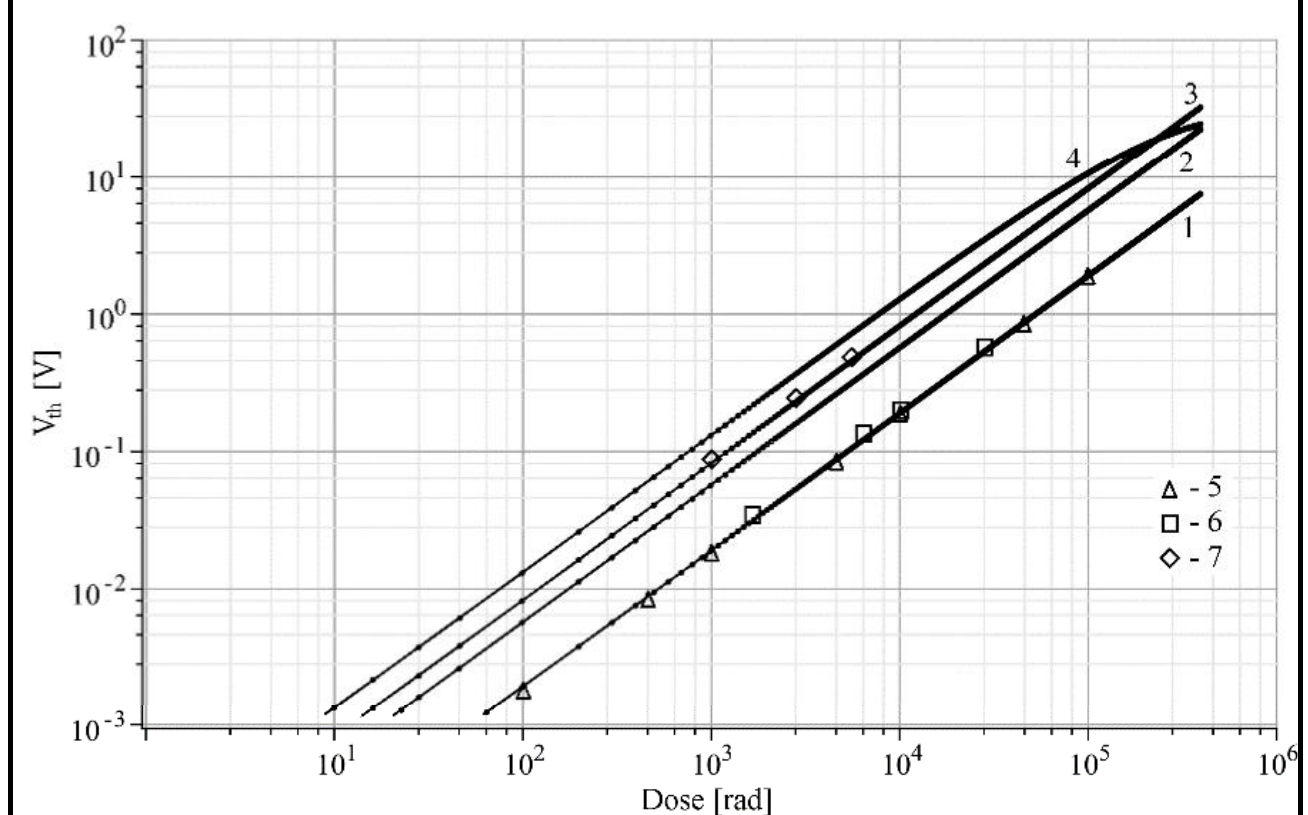


Рис. 3. Зависимости сдвига порогового напряжения МДП сенсора (ΔV_{th}) от дозы гамма-излучения: 1 – без смещения на затворе (5 – [1], 6 – [2] экспериментальные данные); 2 – при положительном смещении на затворе ($E=0,2$ МВ/см); 3 – при положительном смещении на затворе ($E=0,5$ МВ/см, 7 – [2] экспериментальные данные); 4 – при положительном смещении на затворе в режиме сильнополевой инжекции при $E=7,28$ МВ/см

Выводы

На основе полученных экспериментальных данных разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов и радиационных излучений, учитывающая взаимодействие инжектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиационной ионизации. Исследовано влияние величины электрического поля и интенсивности радиационного излучения на процессы генерации и аннигиляции положительного заряда, накапливаемого в пленке подзатворного диэлектрика в результате радиационной и сильнополевой ионизации. Предложены рекомендации по использованию МДП сенсоров радиационных излучений.

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.