

УДК 621.382

ЗАРЯДОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ МДП-СТРУКТУР ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИОННЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2020 г. Д. В. Андреев^a, Г. Г. Бондаренко^b, В. В. Андреев^{a, *},
В. М. Масловский^c, А. А. Столяров^a

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Калужский филиал, Калуга, 248000 Россия

^bНациональный исследовательский университет “Высшая школа экономики”,
Москва, 101000 Россия

^cМосковский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Московская область, 141701 Россия

*e-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 17.08.2019 г.

После доработки 02.09.2019 г.

Принята к публикации 05.09.2019 г.

На основе полученных экспериментальных данных разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов и радиационных излучений. Модель учитывает взаимодействие инжектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиационной и сильнополевой ионизации. Показано, что при взаимодействии инжектируемых электронов с дырками, захваченными в пленке SiO₂, часть дырок может аннигилировать, приводя к образованию поверхностных состояний на границе раздела с кремнием. Изучено влияние напряженности электрического поля и плотности инжекционного тока в условиях воздействия радиационного излучения на процессы генерации и аннигиляции положительного заряда и создание поверхностных состояний. Исследовано влияние зарядовых процессов, протекающих в диэлектрической пленке МДП-структуры при одновременном воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов, на изменение порогового напряжения МДП-приборов и сенсоров радиационных излучений на их основе.

Ключевые слова: МДП-структура, радиационное излучение, сильнополевая инжекция, диэлектрическая пленка, интегральная поглощенная доза, сенсор, дефекты.

DOI: 10.31857/S1028096020030024

ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрические пленки являются ключевыми компонентами во многих электронных приборах — начиная от полевых МДП-транзисторов (МДП — металл–диэлектрик–полупроводник) и заканчивая биполярными интегральными микросхемами. Воздействие ионизирующего излучения может приводить к значительному накоплению заряда в диэлектриках, что часто становится причиной деградации прибора и последующего его выхода из строя [1–11]. В условиях космического пространства (и других экстремальных условиях, например, в ускорителях высокоэнергетических частиц) облучение сильным потоком электронов и протонов может значительно уменьшать срок службы изделий вследствие эф-

фекта полной дозы ионизирующего облучения [1–5]. За последние 30 лет было детально исследовано влияние полной дозы ионизирующего облучения на накопление заряда в диэлектрике [1–9]. Однако эти исследования в основном проводились либо в отсутствие электрических полей, либо в электрических полях слабее инжекционных. С уменьшением линейных размеров элементов современных микросхем все большее количество приборов может эксплуатироваться в сильных электрических полях, обеспечивающих инжекцию носителей заряда в диэлектрическую пленку. Следовательно, исследование процессов радиационной ионизации в МДП-структурах, находящихся в режиме сильнополевой инжекции электронов, вызывает большой научный и практический интерес. Особый интерес представляет

контроль изменения зарядовых характеристик МДП-структур непосредственно в процессе воздействия ионизирующего излучения и сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, поскольку в этих режимах структуру можно использовать как сенсор радиационных излучений и контролировать с его помощью как интенсивность излучения, так и интегральную поглощенную дозу [12–16], существенно расширив его возможности по сравнению с сенсорами RadFET (Radiation sensing Field Effect Transistor).

В настоящей работе исследованы изменения зарядового состояния МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов и радиационных излучений с учетом взаимодействия инжектированных электронов с дырками, захватываемыми в диэлектрической пленке вследствие протекания процессов радиационной и сильнополевой ионизации.

МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ МДП-СТРУКТУР

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO₂ при сильнополевой туннельной инжекции электронов в режиме поддержания постоянного тока, описываемой законом Фаулера–Нордгейма, и воздействия ионизирующих излучений проводили на основе системы уравнений [12, 17, 18], включающей: уравнение сдвига порогового напряжения в результате изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика

$$\Delta V_{th} = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} [p(d_{ox} - x_p) + n_i d_{ox}], \quad (1)$$

уравнение для плотности дырок, накапливаемых в пленке подзатворного диэлектрика при сильнополевой инжекции и радиационном облучении

$$q \frac{dp}{dt} = (J_{inj}\alpha + J_{rad})\sigma_p(N_p - p) - J_{inj}\sigma_{ep}p, \quad (2)$$

уравнение для плотности тока Фаулера–Нордгейма [12, 17]

$$J_{inj} = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (3)$$

уравнение для плотности тока, создаваемого ионизирующим излучением [1–5]

$$J_{rad} = qY(E)K_g d_{ox} I_{rad}, \quad (4)$$

уравнение для количества поверхностных состояний, генерируемых при аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами [17]

$$\frac{dn_{it}^{e-h}}{dt} = \gamma_{e-h} \frac{J_{inj}}{q} \sigma_{ep} p(E, t), \quad (5)$$

где V_{th} – напряжение, определяемое из характеристик $C-V$ и соответствующее образованию ин-

версного канала; q – заряд электрона; $\epsilon\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; x_p – положение центроида (относительно границы Si–SiO₂) положительного заряда в SiO₂; n_i – количество поверхностных состояний; α – коэффициент ионизации в пленке SiO₂ при сильнополевой инжекции; σ_p – сечение захвата дырочных ловушек; N_p – плотность дырочных ловушек; σ_{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; $Y(E)$ – выход заряда при облучении (доля дырок, избежавших рекомбинации); K_g – количество электронно-дырочных пар на единицу дозы и объема SiO₂ ($8 \times 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$); d_{ox} – толщина слоя оксида; I_{rad} – интенсивность облучения; γ_{e-h} – вероятность создания поверхностного состояния в результате электронно-дырочной рекомбинации. Ионизационный ток при воздействии радиационных излучений моделировали с помощью генератора тока. Систему уравнений (1)–(5) решали при следующих начальных условиях: $p(0) = 0$; $n_{it}^{e-h}(0) = 0$.

Коэффициент ионизации в пленке SiO₂ при сильнополевой инжекции (α) для исследуемых МДП-структур рассчитывали с использованием выражений, предложенных в [17, 18]. Моделирование проводили с учетом ранее полученных экспериментальных данных [12, 16] для МДП-структур, изготовленных на кремнии n -типа с термическими пленками SiO₂ толщиной 100 нм и алюминиевым затвором [12, 15, 16]. Такие МДП-структуры были изготовлены промышленным способом и были совместимы с технологией изготовления интегральных микросхем серии CD4000. Данная технология используется для изготовления сенсоров RadFET [13, 14]. Сильнополевые воздействия в основном рассматривали в режиме инжекции электронов из кремниевой подложки (положительное напряжение на затворе) при постоянном токе [19, 20]. Параметры модели, входящие в выражения (1)–(5), полагали равными: $N_p = 10^{13} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_p = 5 \times 10^{-14} \text{ см}^2$; $b_0 = 3 \times 10^{-13} \text{ МВ}^3/\text{см}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для большинства практических приложений, касающихся эксплуатации МДП-приборов или сенсоров RadFET, наибольший интерес представляет влияние протекающих зарядовых явлений на сдвиг порогового напряжения, описываемый формулой (1). Формула (1) учитывает два основных зарядовых процесса, которые наблюдаются при совместном воздействии радиационного излучения и сильнополевой туннельной инжекции электронов, описываемой законом Фаулера–Нордгейма, в диэлектрик из кремниевой

подложки. Именно этот режим инжекции представляет наибольший интерес, поскольку положительное смещение на затворе стимулирует перемещение дырок к границе раздела с кремнием и увеличивает часть дырок, которую захватывают ловушки в диэлектрической пленке у границы раздела с кремнием [1, 12]. Второе слагаемое в уравнении (1) описывает накапливающийся заряд поверхностных состояний, который обычно учитывают при рассмотрении низкоинтенсивных радиационных излучений [6–8]. При радиационных излучениях большой и средней интенсивности заряд поверхностных состояний небольшой по величине, и его часто не принимают во внимание [1, 13, 14]. Однако в режиме сильнополевой инжекции электронов согласно результатам [12, 17, 18, 21, 22] необходимо учитывать процесс генерации поверхностных состояний в результате аннигиляции части захваченных дырок при взаимодействии с инжектированными электронами (уравнение (5)). Уравнение (2) описывает накопление дырок, генерируемых в пленке SiO₂ как в результате радиационной, так и сильнополевой ионизации. В качестве сильнополевой ионизации в основном рассматривают межзонную ударную ионизацию в пленке SiO₂ и инжекцию дырок из анода [11, 17, 18, 21]. Второе слагаемое в формуле (2) описывает процесс аннигиляции части захваченных в диэлектрике дырок в результате взаимодействия с инжектированными электронами. При дальнейших исследованиях в работе рассматривали радиационное излучение относительно большой интенсивности 10 рад/с, и поэтому количество поверхностных состояний в формуле (1) определялось только процессом аннигиляции захваченных дырок с инжектированными электронами и описывалось уравнением (5).

На рис. 1 показана рассчитанная с использованием предложенной модели временная зависимость плотности дырок, накапливающихся в подзатворном диэлектрике МДП-структуры при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов при различной плотности тока. Как видно из рис. 1, при плотности инжекционного тока 10⁻⁸ А/см² и в отсутствие радиационного излучения (кривая 2) практически не наблюдаются генерация и накопление дырочного заряда, что хорошо согласуется с литературными данными и результатами ранних исследований [11, 12, 18]. При совместном воздействии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов при плотности тока 10⁻⁸ А/см² плотность накапливаемых дырок описывается кривой 2' и определяется в основном процессом радиационной ионизации. Для сравнения на рис. 1 приведена кривая 1, рассчитанная для случая, когда инжекционный ток равен нулю, а электрическое поле соответствует плотности инжекционного тока 10⁻⁸ А/см². Кривая 1 не учитывает процесс аннигиляции части накопленного дырочного за-

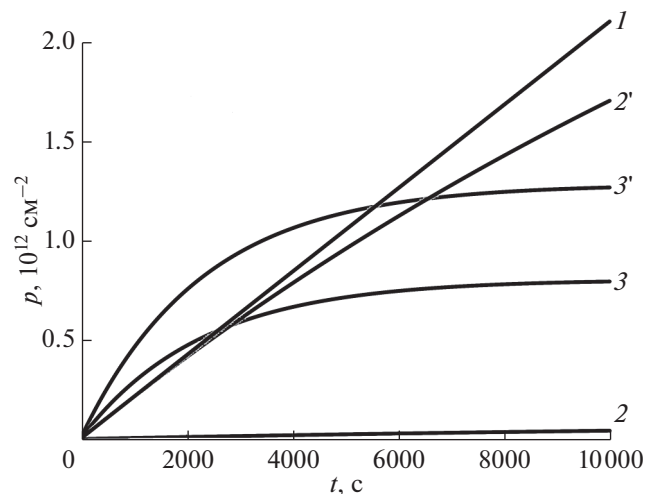


Рис. 1. Плотность дырок, накапливающихся в подзатворном диэлектрике МДП-структуры, в зависимости от времени воздействия при радиационном облучении с интенсивностью 10 рад/с (1, 2', 3') и сильнополевой инжекции электронов (2, 2', 3, 3') при плотности тока: 1 – 0; 2, 2' – 10⁻⁸; 3, 3' – 10⁻⁷ А/см².

ряда в результате взаимодействия с инжектированными электронами. При напряженности электрического поля ниже инжекционной наклон кривой 1 будет меньше [12–14], следовательно, для повышения чувствительности сенсоров RadFET можно использовать инжекционные режимы. Дозовый сдвиг порогового напряжения необходимо калибровать с использованием предложенной модели. При более высокой плотности инжекционного тока (рис. 1, кривые 3 и 3') существенным становится процесс генерации и накопления дырочного заряда в результате сильнополевой ионизации, а также усиливается процесс аннигиляции положительного заряда инжектированными электронами. В результате при больших временах воздействия радиационного излучения и сильнополевой инжекции в диэлектрике накапливается меньший заряд дырок по сравнению с плотностью тока 10⁻⁸ А/см². Следовательно, режим инжекции заряда при плотности тока 10⁻⁷ А/см² нежелательно использовать для сенсоров RadFET.

На рис. 2 показана временная зависимость количества поверхностных состояний, генерируемых в процессе аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами при радиационном облучении и сильнополевой инжекции электронов. Как видно из рисунка, аннигиляция части накопленного в пленке SiO₂ положительного заряда может приводить к генерации большого количества поверхностных состояний. Этот процесс надо учитывать даже в невысоких инжекционных электрических полях (кривая 1'), когда в основном аннигилирует положительный заряд, обусловленный воздействием ионизирующего

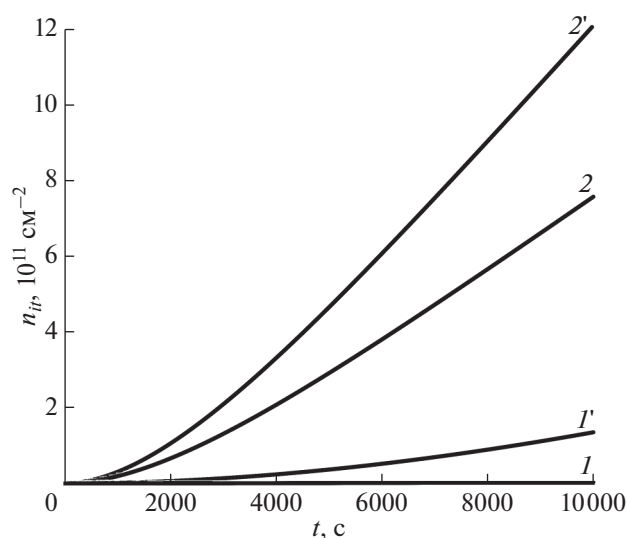


Рис. 2. Количество поверхностных состояний, генерируемых при аннигиляции захваченных дырок инжектированными электронами, в зависимости от времени воздействия при радиационном облучении с интенсивностью 10 рад/с ($1'$, $2'$) и сильнополевой инжекции электронов (1 , 2) при плотности тока: 1 , $1' - 10^{-8}$; 2 , $2' - 10^{-7}$ А/см².

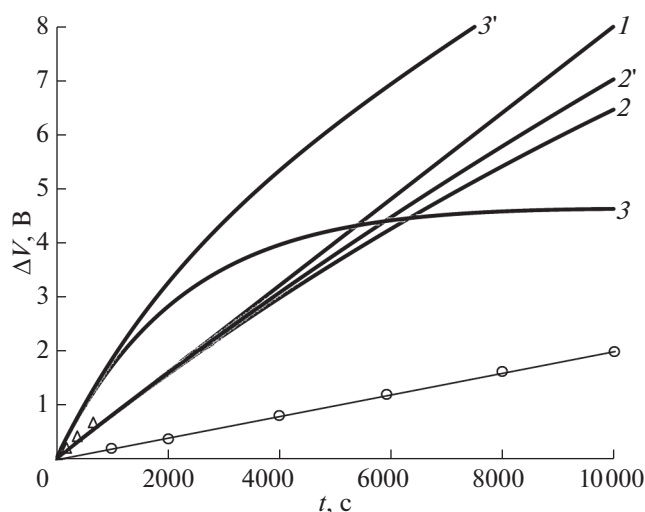


Рис. 3. Сдвиг порогового напряжения в результате изменения зарядового состояния МДП-структуры в зависимости от времени воздействия: 1 – расчет для электрического поля, соответствующего плотности тока 10^{-8} А/см²; 2 , 3 – без учета; $2'$, $3'$ – с учетом образования поверхностных состояний при радиационном облучении с интенсивностью 10 рад/с (1 , 2 , $2'$, 3 , $3'$) и сильнополевой инжекции электронов (2 , $2'$, 3 , $3'$) при плотности тока: 2 , $2' - 10^{-8}$; 3 , $3' - 10^{-7}$ А/см². Символами обозначены экспериментальные значения, полученные: при воздействии гамма-излучения в отсутствие смещающего напряжения на затворе (кружки); при одновременном облучении протонами с энергией 500 кэВ и сильнополевой инжекции при плотности тока 10^{-8} А/см² (треугольники).

излучения. В более сильных электрических полях (кривая $2'$) процесс генерации поверхностных состояний усиливается как за счет возрастания плотности накопленных дырок, так и за счет возрастания потока инжектированных электронов.

На рис. 3 показан сдвиг порогового напряжения в результате изменения зарядового состояния МДП-структуры от времени воздействия без учета (кривые 2 , 3) и с учетом (кривые $2'$, $3'$) образования поверхностных состояний при совместном действии радиационного излучения и сильнополевой инжекции электронов при различной плотности тока. На рис. 3 также приведена теоретическая кривая 1 , полученная для электрического поля, соответствующего плотности тока 10^{-8} А/см². В отсутствие инжекции электронов (J_{inj} полагали равным нулю) не учитывали ни процессы аннигиляции части захваченного положительного заряда, ни возникающие в результате процессы генерации поверхностных состояний. Символами на рисунке обозначены экспериментальные данные, взятые из литературы и полученные в предыдущих исследованиях. Как видно из рис. 3, сильные электрические поля существенно повышают дозовую чувствительность сенсора RadFET [12], однако при контроле интегральной поглощенной дозы желательно обеспечивать режимы, когда процесс радиационной ионизации существенно интенсивнее процесса сильнополевой ионизации.

ВЫВОДЫ

Разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов и радиационных излучений. В данной модели учитывается взаимодействие инжектированных электронов с положительным зарядом, накапливающимся в диэлектрической пленке вследствие протекания процессов радиационной и сильнополевой ионизации. Модель также позволяет определить количество поверхностных состояний, генерируемых в результате аннигиляции дырок, захваченных инжектированными электронами. Показано, что в сенсорах радиационных излучений на основе МДП-структур при контроле интегральной поглощенной дозы желательно обеспечивать режимы, когда процесс радиационной ионизации существенно интенсивнее процесса сильнополевой ионизации. Установлено, что процесс генерации поверхностных состояний при аннигиляции захваченных дырок с инжектированными электронами может вносить существенный вклад в изменение зарядового состояния МДП-структур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 8.6779.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M. et al. // IEEE Transac. Nucl. Sci. 2008. V. 55. P. 1833. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2001040>
2. Fleetwood D.M. // IEEE Transac. Nucl. Sci. 2018. V. 65. P. 1465. <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2786140>
3. Ravotti F. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2018. V. 65. P. 1440. <https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2829864>
4. Chatzikyriakou E., Morgan K., Kees de Groot C.H. // IEEE Transac. Electron Devices. 2018. V. 65. № 3. P. 808. <https://doi.org/10.1109/TED.2018.2792305>
5. Oldham T.R., McLean F.B. // IEEE Transac. Nucl. Sci. 2003. V. 50. № 3. P. 483. <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.812927>
6. Pershenkov V.S. // Facta Universitatis. Ser. Electronics and Energetics. 2015. V. 28. № 4. P. 557. <https://doi.org/10.2298/FUEE1504557P>
7. Zebrev G.I., Orlov V.V., Gorbunov M.S., Drosdetsky M.G. // Microelectronics Reliability. 2018. V. 84. P. 181. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.03.014>
8. Куликов Н.А., Попов В.Д. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. Вып. 1. С. 115. <https://doi.org/10.21883/FTP.2019.01.46998.8900>
9. Александров О.В. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. Вып. 6. С. 793.
10. Andreev D.V., Bondarenko G.G., Andreev V.V. et al. // Acta Phys. Pol. A. 2017. V. 132. P. 245. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.245>
11. Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R. et al. Reliability Wearout Mechanisms in Advanced CMOS Technologies. Wiley-IEEE Press, 2009. 624 p.
12. Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A. // Proc. SPIE. Int. Conf. on Micro- and Nano-Electronics 2018. 2019. V. 11022. P. 1102207. <https://doi.org/10.1117/12.2521985>
13. Siebel O.F., Pereira J.G., Souza R.S. et al. // Rad. Measurements. 2015. V. 75. P. 53. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.03.004>
14. Pejović M.M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. V. 62. P. 1905. <https://doi.org/10.1109/TNS.2015.2456211>
15. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Andreev D.V., Akhmelkin D.M. Sensors Based on MIS Structures for Study of Ionization Radiations. // IEEE Proc. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018. P. 1. <https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337203>
16. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Романов А.В., Лоскутов С.А. // Перспективные материалы. 2015. № 12. С. 25.
17. Arnold D., Cartier E., DiMaria D.J. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. P. 10278.
18. DiMaria D.J., Cartier E., Buchanan D.A. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. P. 304.
19. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 4. С. 94. <https://doi.org/10.7868/S020735281604003X>
20. Andreev V.V., Maslovsky V.M., Andreev D.V., Stolyarov A.A. // Proc. SPIE. Int. Conf. on Micro- and Nano-Electronics 2016. 2016. V. 10224. P. 1022429. <https://doi.org/10.1117/12.2267173>
21. Palumbo F., Wen C., Lombardo S. et al. // Adv. Funct. Mater. 2019. V. 1900657. P. 1. <https://doi.org/10.1002/adfm.201900657>
22. Fleetwood D.M. // Microelectronics Reliability. 2018. V. 80. P. 266. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.11.007>

Charge Effects in Dielectric Films of MIS Structures under Concurrent Influence of Radiation and High-Field Electron Injection

D. V. Andreev¹, G. G. Bondarenko², V. V. Andreev^{1,*}, V. M. Maslovsky³, A. A. Stolyarov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, The Kaluga Branch, Kaluga, 248000 Russia

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia

³Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, Moscow Region, 141700 Russia

*e-mail: vladimir_andreev@bmstu.ru

Based on the obtained experimental data, a model of processes of changing the charge state of MIS structures under concurrent action of high-field tunnel injection of electrons and radiation is developed. The model takes into account an interaction of injected electrons with charges arising in the dielectric film due to radiation and high-field ionization. It is shown that during the interaction between injected electrons and holes trapped in SiO₂ film, some holes can annihilate, resulting in the formation of surface states at the interface with silicon. The effect of the magnitude of electric field and the density of injection current under radiation influence on the processes of generation and annihilation of positive charge and on formation of surface states is studied. The effect of the charge processes taking place in dielectric film of an MIS structure under concurrent influence of radiation and high-field injection of electrons on the change in the threshold voltage of MIS devices and radiation sensors based on them is studied.

Keywords: MIS structure, radiation, high-field injection, dielectric film, integral absorbed dose, sensor, defects.