## ИЗМЕНЕНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ МДП-СТРУКТУР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Д.В. Андреев<sup>1</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2,3</sup>, А.А. Столяров<sup>1</sup>, Д.С. Васютин<sup>1</sup>, А.М. Михальков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал; <sup>2</sup> Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского государственного института электроники и математики (технического университета; <sup>3</sup>Московский государственный институт электроники и математики (технический университет) E-mail: bondarenko gg@rambler.ru

Известно достаточно большое количество работ (см., например [1-3]), посвященных исследованию ионизационных процессов в структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), протекающих под действием радиационных воздействий. Такое внимание этому вопросу уделяется, прежде всего, вследствие необходимости обеспечения радиационной стойкости полупроводниковых приборов и интегральных микросхем изготовленных по МДП-технологии. Однако недостаточно изученным об особенностях остается вопрос ионизационных процессов В МДП-структур сильнополевой диэлектрических слоях В условиях туннельной инжекции под действием радиационных излучений различных видов, что существенно сдерживает практическое использование полевых структур в этих режимах в различных областях науки и техники. Актуальность данных исследований значительно повышается в настоящее время, так как рабочие режимы диэлектрических слоев по мере уменьшения их толщины все более приближаются к инжекционным, а в инжекционными. ряде случаев И становятся Другим важным направлением этих исследований является использование МДП-структур в сенсоров радиационных качестве активных элементов излучений, основанных на анализе ионизационных процессов, протекающих как в пространственного области заряда полупроводника, так И В диэлектрической пленке [2].

В данной работе предложена модель изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции в диэлектрик постоянным током, учитывающая действие ионизирующих излучений на образец. Проведено моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур при воздействии радиационных излучений.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO<sub>2</sub> при сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов в режиме поддержания постоянного тока проводилось на основе следующей системы уравнений [4-6]:

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния

$$\Delta V_{I}(+) = \frac{q}{\epsilon \epsilon_{0}} \Big[ n_{t0}(d_{ox} - x_{n0}) + n_{t}(d_{ox} - x_{n}) - p(d_{ox} - x_{p}) \Big]$$
(1)

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из металлического электрода

$$\Delta V_{I}(-) = \frac{q}{\epsilon \varepsilon_{0}} \left[ n_{t0} x_{n0} + n_{t} x_{n} \right]$$
<sup>(2)</sup>

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO<sub>2</sub> на исходных ловушках

$$\mathbf{n}_{t0} = \mathbf{N}_{t0} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\sigma}_{t0} \cdot \mathbf{Q}_{inj}}{q}\right) \right]$$
(3)

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO<sub>2</sub> на вновь созданных ловушках

$$n_{t} = \frac{g}{q} \cdot Q_{inj} - \frac{g}{\sigma_{g}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{g} \cdot Q_{inj}}{q}\right) \right]$$
(4)

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO<sub>2</sub>

$$q\frac{dp}{dt} = J_{inj} \cdot [(m-1)] \cdot \sigma_p \cdot (N_p - p) - J_{inj} \cdot \sigma_n \cdot p$$
(5)

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$\mathbf{J}_{\rm inj} = \mathbf{A}\mathbf{E}^2 \exp\left(-\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{E}}\right),\tag{6}$$

- уравнение нейтральности зарядов

$$Q_0 = Q_c + Q_{inj} + Q_{ion} \tag{7}$$

где q - заряд электрона; єє<sub>0</sub> - диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $n_{t0}$  и  $n_t$  – плотности электронов, накапливаемых в SiO<sub>2</sub> на исходных и вновь созданных ловушках соответственно; p - плотность дырок, накапливаемых в SiO<sub>2</sub>;  $d_{ox}$  – толщина подзатворного диэлектрика;  $x_{n0}$ ,  $x_n$ , и  $x_p$  - положения центроидов (относительно границы Si- SiO<sub>2</sub>) отрицательного заряда в SiO<sub>2</sub> на исходных ловушках, отрицательного заряда в SiO<sub>2</sub> на исходных и положительного заряда в SiO<sub>2</sub> соответственно;  $\sigma_g$  - сечения захвата вновь созданных электронных ловушек;  $N_t$  и  $\sigma_t$  - плотности и сечения захвата электронных ловушек в пленке SiO<sub>2</sub>; t – время;  $Q_{inj}$  – заряд, инжектированный в диэлектрик ( $Q_{inj}$  =

J<sub>ini</sub>·t); (m-1) – коэффициент генерации дырок (m – коэффициент умножения электронов); g – коэффициент генерации дырок из анода; N<sub>p</sub> и  $\sigma_p$  плотности и сечения захвата дырочных ловушек;  $\sigma_n$  - сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов; A=1,54·10<sup>-6</sup>·m<sub>0</sub>/m<sup>\*</sup>· $\phi_{B}^{-1}$  [A/B<sup>2</sup>] и B=6,83·10<sup>7</sup>·m<sub>0</sub>/m<sup>\*</sup>· $\phi_{B}^{-3/2}$  [B/см] – постоянные туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму; m<sub>0</sub> и m<sup>\*</sup> - масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике;  $\phi_{\rm B}$  - высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела; E – напряженность катодного электрического поля; Q<sub>0</sub> – заряд, подводимый к образцу ( $Q_0 = J_0 \cdot t$ ) импульсом постоянного тока плотностью  $J_0$ ;  $Q_c - 3аряд$ , накапливаемый ёмкостью МДП-структуры ( $Q_c = C_{mos} \cdot V_I(t)$ ),  $C_{mos}$  - емкость структуры, V<sub>I</sub>(t) – временная зависимость падающего на образце напряжения; Q<sub>ion</sub> – заряд, созданный в диэлектрике ионизацией (Q<sub>ion</sub> = J<sub>ion</sub>·t), J<sub>ion</sub> – плотность тока ионизации. Импульс ионизационного тока от воздействия радиационного излучения моделировался генератором тока.

Система (1-7) решалась при следующих начальных условиях:  $n_{t0}(0) =$ n<sub>t</sub>(0) = p(0) = 0. Плотность захваченных дырок находилась путем численного решения методом Рунге-Кутта четвертого-пятого порядка (5),дифференциального уравнения В котором сечение захвата электронов  $\sigma_n$  имеет полевую зависимость  $\sigma_n = b_0 \cdot E^{-3}$ , где  $b_0$  - параметр модели, Е - напряженность электрического поля в диэлектрике (МВ/см). Коэффициент генерации дырок рассчитывался с использованием выражений, предложенных в [4]:

$$m-1 = P_{mf} \cdot \left[\frac{E}{E_{th}^{ii}} - 1\right]^4, \qquad (8)$$

где величины порогового поля  $E_{th}^{ii}$  (MB/см) и коэффициента  $P_{mf}$  определяются как:

$$E_{th}^{ii} = E_{th}^{\infty} \cdot \left[ 1 + \frac{t_1}{d_{ox} - t_d} \right]$$
(9)

И

$$P_{mf} = P_{o} \cdot (d_{ox} - t_{d}) + P_{1} \cdot \frac{1}{d_{ox} - t_{d}} , \qquad (10)$$

где  $d_{ox}$  - толщина слоя окисла. Для толщин окисла больше 30 нм параметры, входящие в выражения (9) и (10), были следующими:  $E_{th}^{\infty} = 6,4$  MB/cm;  $t_d = 8,2$  нм;  $t_1 = 1,56$  нм;  $P_o = 9 \cdot 10^{-3}$  нм<sup>-1</sup>;  $P_1 = 3$  нм.

Параметры модели, входящие в выражения (1-7), полагались следующими [6]:  $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ;  $b_o = 3 \cdot 10^{-13} \text{ MB}^3/\text{см}$ ;  $N_p = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ;  $\sigma_t = 1 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ ;  $N_t = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ;  $g = 3 \cdot 10^{-7}$ ;  $\sigma_g = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

Результаты моделирования радиационных воздействий на МДПструктуры, экспериментально исследованные в [7] и находящиеся в режиме инжекции электронов из кремния импульсом постоянного тока, приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 показан высоковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного тока плотностью 10<sup>-6</sup> А/см<sup>2</sup>. Для зависимостей, показанных на рис.1, плотность тока ионизации была меньше плотности импульса постоянного тока, подводимого к структуре. Как видно из рис. 1, с увеличением амплитуды ионизационного тока уменьшается напряжение, падающее на структуре. На рис.2 приведены временные зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции при протекании через диэлектрик постоянного тока плотностью 10<sup>-7</sup> А/см<sup>2</sup>. Плотность тока ионизации для зависимостей, изображенных на рис. 2, была больше плотности импульса постоянного тока, подводимого к структуре. Из зависимостей, приведенных на рис.2, видно, что с увеличением ионизационного тока возрастает скорость разряда емкости МДП-структуры.

На основе моделирования показано, что возникновение ионизационного тока в диэлектрической пленке приводит к уменьшению или полному прекращению инжекционного тока и, как следствие, к снижению напряжения, падающего на диэлектрической пленке. Следовательно, при радиационном воздействии снижаются электрические поля, прикладываемые к диэлектрику, уменьшаются деградационные процессы, связанные с полевой инжекцией электронов, и, в основном, изменение зарядового состояния МДП-структур в этих условиях обусловлено ионизационными процессами.

Если величина ионизационного тока меньше амплитуды импульса тока (рис.1), то режим сильнополевой инжекции сохраняется, а напряжение на МДП-структуре уменьшается в соответствии со снижением инжекционного тока. При использовании данного режима для оценки характеристик радиационных излучений желательно, чтобы величина ионизационного тока находилась в диапазоне  $(0,1 \div 0,9)I_0$ .



Рис.1. Высоковольтные участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного тока плотностью  $J_0 = 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. На участках 1,2,4,6,8,10 облучение отсутствует. На участках 3,5,7,9 действует излучение, при этом на участках:  $3 - J_{ion} = 0,9 \cdot J_0$ ;  $5 - J_{ion} = 0,8 \cdot J_0$ ;  $7 - J_{ion} = 0,5 \cdot J_0$ ;  $9 - J_{ion} = 0,1 \cdot J_0$ .

Если величина ионизационного тока больше амплитуды импульса тока (рис.2), то режим сильнополевой инжекции прекращается, а напряжение на МДП-структуре линейно уменьшается, что соответствует процессу разряда емкости МДП-структуры. При использовании данного режима для оценки характеристик радиационных излучений желательно, чтобы величина ионизационного тока находилась в диапазоне (2 ÷ 10)I<sub>0</sub>.

Таким образом, результаты моделирования показали, что ионизационные процессы, протекающие в диэлектрических пленках МДПструктур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов импульсом постоянного тока, можно использовать для регистрации радиационных излучений. При этом для повышения точности регистрации измерение ионизационного тока желательно проводить при нескольких амплитудах импульса постоянного тока, как меньших, так и больших амплитуды ионизационного тока.



Рис.2. Временные зависимости напряжения на МДП-структуре, находящейся в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния, при протекании через диэлектрик постоянного тока плотностью  $J_0 = 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>. На участках 1,2,8,9 облучение отсутствует. На участках 3,4,5,6,7 действует излучение, при этом на участках:  $3 - J_{ion} = 10 \cdot J_0$ ;  $4 - J_{ion} = 5 \cdot J_0$ ;  $5 - J_{ion} = 3 \cdot J_0$ ;  $6 - J_{ion} = 2 \cdot J_0$ .

## Выводы

Предложена модель изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся сильнополевой инжекции диэлектрик В режиме В постоянным током, учитывающая действие ионизирующих облучений. что ионизационные процессы, протекающие В Показано. сильных электрических полях в диэлектрических пленках МДП-структур, можно использовать для регистрации радиационных излучений, а для повышения точности регистрации измерение ионизационного тока желательно проводить при нескольких амплитудах импульса постоянного тока, как меньших, так и больших амплитуды ионизационного тока.

- В.А. Гуртов, А.М. Назаров, И.В. Травков. Моделирование процесса накопления объемного заряда в диэлектриках МДП-структур при облучении// ФТП, 1990, т.24, вып.6, с.969-977.
- 2. T.R. Oldhem, J.M. McGarrity. Ionization of SiO<sub>2</sub> by Heavy Charged Particles/ IEEE Transaction on Nuclear Science, 1981,vol. NS-28, No. 6, pp.3975-3980.

- 3. В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. М.: Энергоатомиздат, 1988, 256 с.
- 4. D. Arnold, E. Cartier, D.J. DiMaria. Theory of high-field electron transport and impact ionization in silicon dioxide// Phys. Rev. B, 1994, vol.49, No. 15, pp.10278-10297.
- C. Chen, C. Wu. A characterization model for constant current stressed voltage-time characteristics of thin thermal oxides grown on silicon substrate // J. Appl. Phys., 1986, vol.60, No.11, pp.3926-3944.
- G.G. Bondarenko, V.V. Andreev, V.E. Drach, S.A. Loskutov, M.A. Stolyarov. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films, 2006, vol.515, pp. 670-673.
- 7. В.В. Андреев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Лычагин, А.А. Столяров, С.Е. Ульяненко. Радиационная ионизация в структурах металл-диэлектрик-полупроводник в режиме сильнополевой инжекции электронов// Физика и химия обработки материалов, 2006, № 5, с. 19-23.