

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПАРАМЕТРЫ МДП-ПРИБОРОВ

Рассматривается модель, описывающая пространственно-временную эволюцию заряда, возникающего в диэлектрике структуры металл-диэлектрик-полупроводник при воздействии на нее ионизирующего излучения. Решение системы уравнений находится разностным методом. Представлены результаты численного моделирования.

Введение

В настоящее время в военной и космической технике широко применяются интегральные схемы различной степени интеграции, дискретные приборы, детекторы и фотопреобразователи солнечной энергии. Специфическими условиями эксплуатации интегральных схем на борту космических аппаратов является низкоинтенсивное воздействие ионизирующего излучения космического пространства, приводящее к радиационной деградации микросхем и выходу из строя электронной аппаратуры. Один из основных механизмов такой деградации – изменение свойств подзатворных диэлектриков в МОП-структурах. В связи с этим исследования связанные с обеспечением (прогнозированием и повышением) радиационной стойкости биполярных и МОП ИМС являются актуальными. Важнейшим, необходимым инструментом исследования служит математическое моделирование. При этом предполагается высокий уровень кинетических моделей, качественные вычислительные алгоритмы.

В данной работе рассматривается физико-математическая модель, описывающая процессы накопления индуцированного ионизирующей радиацией заряда в диэлектрике структуры Si-SiO₂ и последующей его релаксации за счёт туннельной разрядки при облучении гамма-квантами структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП). Для описания этой модели привлекаются модели, представленные в работах [1–3]. Физико-математическая модель представляет собой систему уравнений [1, 2], в которую входят уравнения в частных производных для описания кинетики свободных электронов и дырок, обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие кинетику накопленного дырочного заряда на ловушечных уровнях, уравнение Пуассона, решение которого позволяет определить распределение напряженности электрического поля в диэлектрике. Туннельный механизм разрядки накопленного заряда в слое диэлектрика описан обыкновенным дифференциальным уравнением [3]. Распределение потенциала в МДП-структуре при наличии заряда в диэлектрике и на поверхностных состояниях описывается уравнением электронейтральности.

Для решения задачи разработан численный метод и проведено численное моделирование радиационно-индуцированного изменения порогового напряжения МДП-структуры *poly-Si-SiO₂-Si* в зависимости от дозы радиации.

1. Постановка задачи

В области $\Omega = \{0 < x < d, 0 < t \leq t_f\}$ рассмотрим систему уравнений, описывающую пространственно-временную эволюцию заряда, возникающего в диэлектрике МДП-структуры при воздействии на нее ионизирующего излучения [1]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{\partial(n \cdot E)}{\partial x} - R_{n1}(n, E, P_{t1}) - R_{n2}(n, E, P_{t2}) + G(E), \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \mu_p \frac{\partial(p \cdot E)}{\partial x} - R_{p1}(p, E, P_{t1}) - R_{p2}(p, E, P_{t2}) + G(E), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{t1}}{\partial t} = R_{p1}(p, E, P_{t1}) - R_{n1}(n, E, P_{t1}), \quad \frac{\partial P_{t2}}{\partial t} = R_{p2}(p, E, P_{t2}) - R_{n2}(n, E, P_{t2}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{q}{\varepsilon} (P_{t1} + P_{t2} + p - n). \quad (4)$$

Туннельный механизм разрядки накопленного заряда описывается уравнением [3]:

$$\frac{\partial P_t}{\partial t} = -\alpha_1 \exp(-\alpha_2 x) P_t. \quad (5)$$

Систему (1) – (5) решаем совместно с уравнением электронейтральности МДП-структуры

$$V_G = \varphi_{ms} + \psi_s - \left(\frac{Q_{0t}}{C_{ox}} + \frac{Q_{sc}(\psi_s)}{C_{ox}} + \frac{Q_{ss}(\psi_s)}{C_{ox}} \right). \quad (6)$$

Здесь n, p – концентрации свободных электронов и дырок; E – напряженность электрического поля в диэлектрике; $P_{t1,2}$ – концентрации дырочного заряда, захваченного на ловушках; D_n, D_p – коэффициенты диффузии; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок; G – темп генерации излучением электронно-дырочных пар; $R_{n1,2}, R_{p1,2}$ – скорости захвата электронов и дырок на ловушечные уровни; q – заряд электрона; ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; V_G – напряжение на затворе МДП-структуры; φ_{ms} – разность работ выхода материала затвора и полупроводника; ψ_s – поверхностный потенциал полупроводника; Q_{0t} – эффективный заряд в диэлектрике, захваченный на ловушечные уровни; Q_{sc} – заряд области пространственного заряда полупроводника; Q_{ss} – заряд на поверхностных состояниях; C_{ox} – емкость слоя диэлектрика, α_1, α_2 – частотный и барьерный факторы.

На границе области моделирования справедливы условия

$$\begin{aligned} n(0, t) = n(d, t) = 0, \quad p(0, t) = p(d, t) = 0, \quad 0 < t \leq t_f; \quad Q_{0t}(0) = Q_{ss}(0) = 0; \\ n(x, 0) = p(x, 0) = P_{t1}(x, 0) = P_{t2}(x, 0) = 0, \quad E(x, 0) = g(\psi_s(0)), \quad 0 \leq x \leq d. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение системы (1) – (7) находится разностным методом [3]. Для реализации предложенной разностной задачи разработан итерационный алгоритм.

2. Результаты численного моделирования

Разработанная модель позволяет определить изменение порогового напряжения МДП-структуры в процессе облучения, распределение свободных и захваченных на ловушечные уровни зарядов в диэлектрике, напряжённости электрического поля. Приведем некоторые результаты расчетов. Полагаем: доза ионизирующего излучения $D=5 \cdot 10^5$ Р, концентрация легирующей примеси в кремнии $N_B=10^{15}$ см⁻³, толщина слоя диэлектрика $d=100$ нм, $\mu_n = 10^2$ см²В⁻¹с⁻¹, $\mu_p=0,6 \cdot 10^{-3}$ см²В⁻¹с⁻¹, температура $T=300$ К.

На рисунке 1 отражено распределение дырочного заряда на мелких и глубоких ловушечных уровнях после облучения. Изменение порогового напряжения МДП-структуры в зависимости от напряжения V_G на затворе в процессе облучения гамма-квантами представлено на рисунке 2.

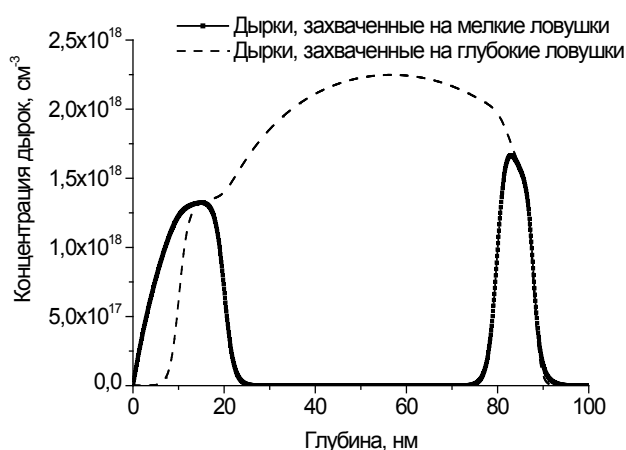


Рисунок 1 – Распределение дырочного заряда на ловушечных уровнях после облучения

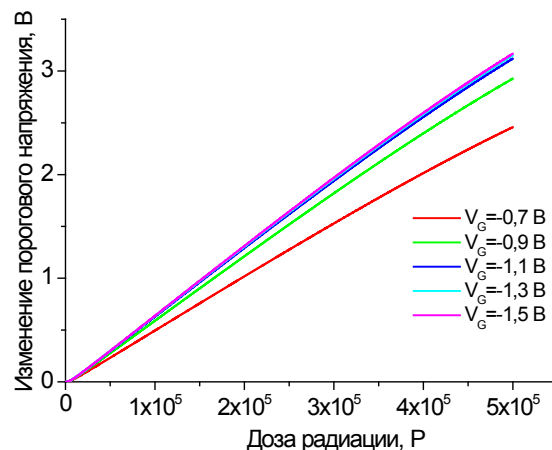


Рисунок 2 – Зависимость изменения порогового напряжения МДП-структуры от дозы облучения

Список литературы

1. Левин, М.Н. Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем / М.Н.Левин, А.В.Татаринцев, В.А.Макаренко, В.Р. Гитлин // Микроэлектроника. – 2006. – Т. 35, № 5. – С. 382 – 391.
2. Заяц, Г.М. Численное моделирование влияния низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства на параметры МДП-приборов / Г.М. Заяц, Ф.Ф. Комаров, А.Ф. Комаров, С.А. Мискевич // XI Белорусская математическая конференция: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 5-9 ноября 2012 г. Часть 3. – Мн.: Институт математики НАН Беларуси, 2012. – С. 42 – 43.
3. MCWhorter, P.J. Modelling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment / P.J. MCWhorter, S.L. Miller, W.M. Miller // IEEE Trans. Nuclear Physics. – 1990. – Vol. 37, № 6. – P. 1682 – 1689.
4. Самарский, А.А. Теория разностных схем. 3-е изд., испр./ А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 616 с.

A model describing the space-time evolution of the charge appearing in the dielectric structure of the metal-insulator-semiconductor under ionizing radiation is considered. The solution of the equations system is obtained by a difference method. Numerical simulation results are presented.

Заяц Г.М., в.н.с. Института математики НАН Беларуси, к.ф.-м.н., Минск, Беларусь, e-mail: zayats@im.bas-net.by

Комаров А.Ф., гл.н.с. НИИПФП им. А.Н.Севчено БГУ, д.ф.-м.н., Минск, Беларусь, e-mail: KomarAF@bsu.by

Мискевич С.А., н.с. НИИПФП им. А.Н.Севчено БГУ, Минск, Беларусь