

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК-ПОЛУПРОВОДНИК ПРИ СИЛЬНОПОЛЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИЭЛЕКТРИК

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

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал*

E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru

² *Московский государственный институт электроники и математики*

E-mail: niipmt@cea.ru

В настоящей работе на основе ранее полученных экспериментальных данных [1-3] предложена модель модификации МДП-структур с наноразмерной термической плёнкой SiO_2 , пассивированной слоем ФСС, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. На основе предложенной модели исследованы процессы зарядовой модификации МДП-структур $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$ при сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремния в режиме постоянного тока, а также проведено исследование влияния параметров, входящих в модель на процессы инжекционной модификации.

Наличие плёнки ФСС и связанное с ней накопление отрицательного заряда при инжекции заряда в диэлектрик существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур с двухслойным диэлектриком $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ по сравнению с МДП-системами без пассивации фосфором. Однако в модели, предложенной в [3] и описывающей изменение зарядового состояния МДП-систем с плёнкой $\text{SiO}_2\text{-ФСС}$ в широком диапазоне инжектируемых зарядов и условий инжекции, учитывается только термическая ионизация дырочных ловушек. В тоже время полученные экспериментальные данные указывают на то, что температура может оказывать существенное влияние на заполнение электронных ловушек. Попытка учесть термическую ионизацию электронных ловушек была предпринята в [4], однако в данной работе принимались во внимание электронные ловушки, локализованные только в слое ФСС и имеющие одно сечение захвата. Проектирование полупроводниковых приборов с инжекционной модификацией параметров, работающих в широком диапазоне температур, требует разработки общей модели зарядовой модификации и деградации МДП-системы $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$, учитывающей влияние температуры как на генерацию положительного заряда, так и на накопление отрицательного заряда.

Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур с термической пленкой SiO_2 , пассивированной слоем ФСС, при сильнополевой туннельной инжекции электронов по Фаулеру-Нордгейму предлагается проводить на основе системы уравнений, предложенной в [1,3], проведя их уточнение пу-

тем учета процесса термического выброса электронов с ловушек, как в пленке ФСС, так и в объеме SiO₂. Тогда уточненная система уравнений будет иметь вид:

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

$$\Delta V_I(+)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{pg}(d_{ox}-x_{pg})+n_t(d_{ox}-x_n)-p(d_{ox}-x_p)\right] \quad (1)$$

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

$$\Delta V_I(-)=\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left[n_{pg}x_{pg}+n_tx_n\right] \quad (2)$$

- уравнение для плотности положительного заряда, накапливаемого в пленке SiO₂

$$q\frac{dp}{dt}=J_n\cdot[(m-1)+g]\cdot\sigma_p\cdot(N_p-p)-J_n\cdot\sigma_n\cdot p-qp\nu\exp\left(-\frac{E_{at}}{kT}\right), \quad (3)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма

$$J_n=AE^2\exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (4)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в слое ФСС

$$n_{pg}=\sum_{i=1}^3N_{pgi}\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_{pgi}+\beta_i}{q}Q_{inj}\right)\right] \quad (5)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO₂

$$n_t=N_t\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{\sigma_t+\beta_t}{q}Q_{inj}\right)\right] \quad (6)$$

где q – заряд электрона; $\varepsilon\varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; n_{pg} и n_t – плотности электронов, накапливаемых в ФСС и SiO₂ соответственно; p – плотность дырок, накапливаемых в SiO₂; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; x_{pg} , x_n , и x_p – положения центроидов (относительно границы Si- SiO₂) отрицательного заряда в ФСС, отрицательного заряда в SiO₂ и положительного заряда в SiO₂ соответственно; N_{pgi} и σ_{pgi} – плотности и сечения захвата i -х электронных ловушек в пленке ФСС; N_t и σ_t – плотности и сечения захвата электронных ловушек в пленке SiO₂; t – время; Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; $(m-1)$ – коэффициент генерации дырок (m – коэффициент умножения электронов); g – коэффициент генерации дырок из анода; N_p и σ_p – плотности и сечения захвата дырочных ловушек в SiO₂; σ_n – сечения захвата инжектированных электронов, заполненными дырочными ловушками; $A=1,54\cdot 10^6\cdot m_0/m^*\cdot\varphi_B^{-1}$ [A/B²] и $B=6,83\cdot 10^7\cdot m_0/m^*\cdot\varphi_B^{3/2}$ [B/см] – постоянные туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; φ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела; E – напряженность катодного электрическо-

го поля; β_i – сечение генерации i -х электронных ловушек в пленке ФСС; β_t – сечение генерации электронных ловушек в пленке SiO₂. Система (1-6) решалась при начальных условиях: $n_{pg}(0) = n_t(0) = p(0) = 0$.

Параметры модели, входящие в выражения (1-6), полагались следующими: $\sigma_p = 5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$; $b_o = 3 \cdot 10^{-13} \text{ МВ}^3/\text{см}$; $N_p = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_t = 1 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$; $N_t = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_{pg1} = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$; $\sigma_{pg2} = 3,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$; $N_{pg1} = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $N_{pg2} = 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $\beta_i = 4,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$; $\beta_t = 5,7 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$;

Результаты расчета с использованием описанной модели приведены на рис. 1, где показано изменение напряжения на МДП-структуре в процессе туннельной инжекции электронов из кремния (1,2,3) и алюминия (1', 2', 3') в режиме протекания постоянного тока 10^{-6} А/см^2 в зависимости от величины инжектированного заряда для образцов различных групп, отличающихся технологией получения и параметрами слоя ФСС (таблица 1). Поскольку центр тяжести отрицательного заряда, накапливаемого в пленке ФСС, находится значительно дальше дистанции туннелирования от границы Si-SiO₂, то при инжекции электронов из кремния этот заряд оказывает практически одинаковое влияние как на сдвиги напряжения плоских зон ΔV_{FB} , так и на напряжения туннельной инжекции ΔV_I . Приращения напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из металлического электрода $\Delta V_I(-)$ значительно превосходят приращения напряжения при инжекции из кремния $\Delta V_I(+)$, что объясняется положением центра тяжести отрицательного заряда, накапливаемого в ФСС.

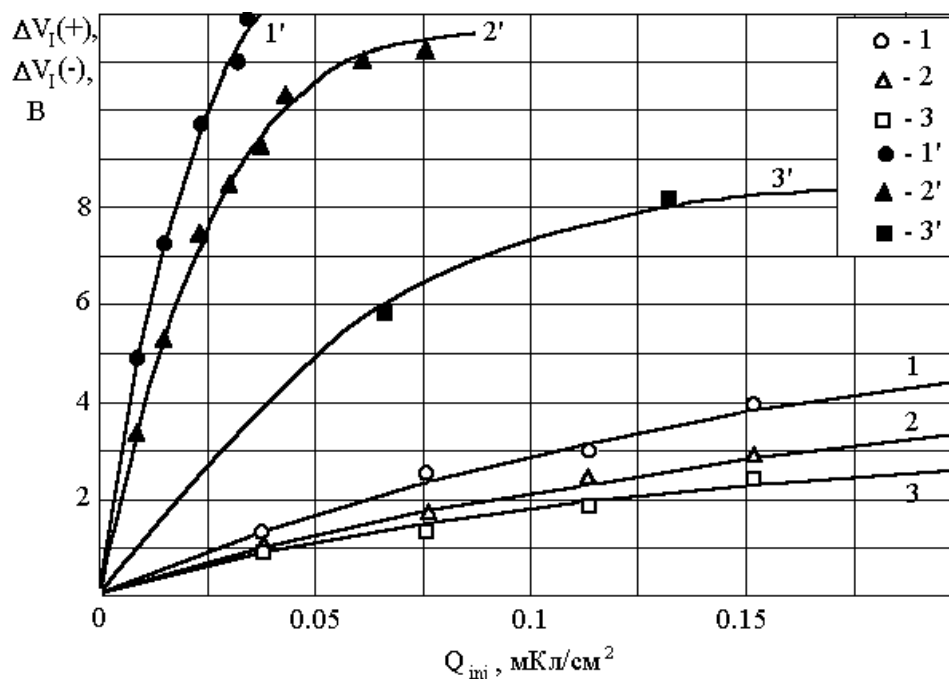


Рис. 1. Экспериментальные (значки) и теоретические (сплошные линии) зависимости приращения напряжений на МДП-структуре в процессе туннельной инжекции электронов из кремния $\Delta V_I(+)$ (1, 2, 3) и алюминия $\Delta V_I(-)$ (1', 2', 3') в зависимости от величины инжектированного заряда для образцов различных групп табл.1: I – (1, 1'); II – (2, 2'); III – (3, 3').

Как видно из рисунка 1, результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными. Таким образом, измеряя приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_1 и используя предложенную модель, можно контролировать изменение зарядового состояния образца в процессе инжекции электронов при любой полярности токового импульса, что позволяет проводить прецизионную корректировку пороговых напряжений МДП-приборов.

Таблица 1. Параметры пленки ФСС.

Параметры	Номер группы		
	I	II	III
1. Время загонки фосфора, мин.	6	4	3
2. Толщина слоя ФСС, нм	27	18	13
3. Концентрация фосфора в ФСС, %	2	1	0,7
4. Пространственное расположение центра отрицательного заряда (от границы Si-SiO ₂), нм	84	87	90

На основе экспериментальных данных и результатов моделирования, проведенных в математическом пакете Mathcad, были определены параметры модели, характеризующие процессы модификации и деградации МДП-структур с термической плёнкой SiO₂, пассивированной слоем ФСС, в условиях управляемой сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик, учитывающие влияние температуры как на генерацию положительного заряда, так и на накопление отрицательного заряда.

Список литературы

1. В.В. Андреев, В.Г. Барышев, Г.Г. Бондаренко, А.А. Столяров, В.А. Шахнов Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции // Микроэлектроника. 1997. № 6. С.640-646.
2. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Дегтярев В.Т., Столяров А.А., Драч В.Е. Исследование процессов сильнополевой инжекционной модификации и деградации МДП-структур// Перспективные материалы. 2004. № 2. С.20-26.
3. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields // Thin solid films. 2006. V.515. 670-673.
4. Электронный захват в МДП-структурах с термическим оксидом кремния при туннельной инжекции / В.С.Солдатов, Н.В.Соболев, И.Б. Варлашов и др. // Изв. вузов. Физика.-1989.-№ 12.-С.82-84.