УДК 621.382

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ

Новиков П.Э., Стемпицкий В.Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, p.novikov@bsuir.by

Аннотация: в работе представлен статистический анализ процедуры экстракции параметров компактных моделей сегнетоэлектрических конденсаторов на основе оксида гафния. С использованием метода Монте-Карло и аддитивного гауссовского шума с относительным стандартным отклонением 2 % показано, что параметры, описывающие переключение поляризации и токи утечки, извлекаются со средней абсолютной процентной ошибкой не более 2,1 %. Для емкостных параметров, включая диэлектрическую проницаемость интерфейсного слоя и концентрацию носителей заряда в обедненных областях, характерна ошибка от 15 до 86 %. Выявлены причины слабой идентифицируемости: неустойчивость экстраполяции линейной регрессии обратной емкости при малой толщине интерфейсного слоя и эффект экранирования пика нелинейной емкости обедненной области линейными емкостями структуры. Предложены рекомендации по фиксации слабо идентифицируемых параметров.

Ключевые слова: сегнетоэлектрическая память, оксид гафния, компактная модель, экстракция параметров, метод Монте-Карло, Verilog-A, FeRAM.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегнетоэлектрические конденсаторы на основе оксида гафния (HfO_2) рассматриваются как элементная база энергонезависимой памяти и нейроморфных схем [1]. Интеграция данных устройств в схемотехнические САПР требует использования компактных моделей на языках описания аппаратуры (например, Verilog-A) [2], для которых, в отличие от моделей МОП-транзисторов, систематизированные методики идентификации параметров отсутствуют, а их уточнение проводится путем ручной подгонки [3]. Цель работы – оценка границ идентифицируемости параметров компактных моделей сегнетоэлектрических конденсаторов из стандартного набора экспериментальных характеристик для соответствующего типа устройств.

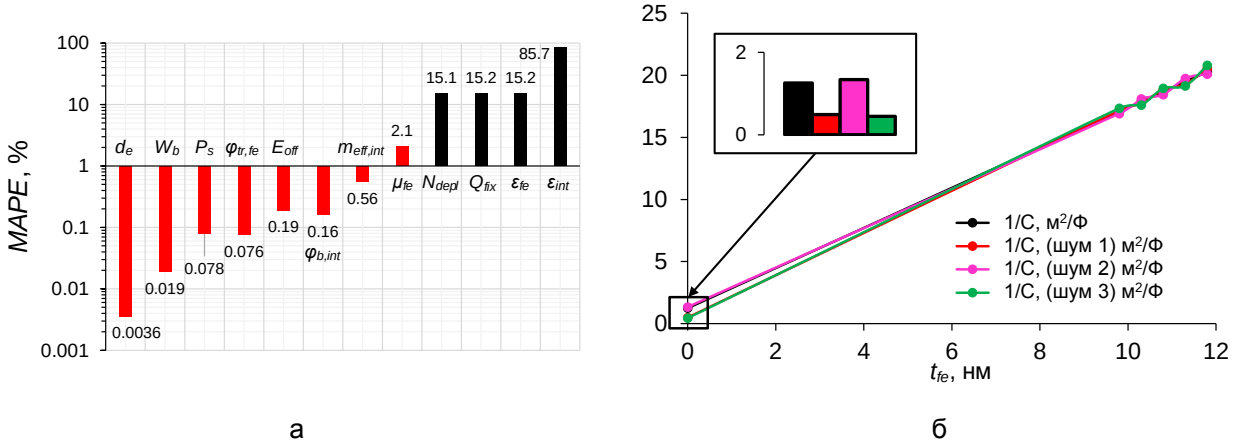
II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Исследована компактная модель *Heracles*, в соответствии с которой конденсатор разделяется на сегнетоэлектрический слой (*fe*), интерфейсный слой (*int*) и обедненные слои электродов (*depl*); полная таблица параметров модели приведена в [2]. Проведена генерация стандартных эксплуатационных характеристик конденсатора, имитирующих экспериментальные данные и включающих вольт-фарадные характеристики при частоте 10 Гц, вольт-амперные характеристики при температурах 21 и 85 °C (от 0 до 3 В в обоих случаях), зависимость емкости от толщины сегнетоэлектрика (в диапазоне от 9,8 до 11,8 нм) и переходные характеристики при воздействии ступенчатых импульсов напряжения амплитудой 0,8; 0,9 и 1,0 В. На все массивы данных наложен гауссовский шум с относительным стандартным отклонением 2 %. Оценка идентифицируемости выполнена методом Монте-Карло за 100 итераций, для каждой из которых параметры модели варьировались в физически корректных пределах, после чего выполнены их последовательная экстракция (идентификация) и сравнение с истинными (исходными) значениями.

Параметры переключения поляризации (спонтанная поляризация P_s, внутреннее поле E_{off}, расстояние действия поля d_e, энергетический барьер W_b) и токов утечки (высота барьера $\varphi_{b,int}$, эффективная масса m_{eff}, уровень ловушки $\varphi_{tr,fe}$, подвижность μ_{fe}) извлекаются со средней относительной ошибкой (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE) не более 2,1 %, что соответствует однозначной идентификации вольт-амперных и переходных характеристик, полученных с использованием моделей Фаулера-Нордгейма и Пула-Френкеля.

Емкостные параметры (диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрического слоя ε_{fe}, диэлектрическая проницаемость интерфейсного слоя ε_{int}, концентрация носителей заряда в обедненных областях электродов N_{depl}, плотность заряда на границе раздела сегнетоэлектрического и интерфейсного слоев Q_{fix}) имеют *MAPE* от 15 до 86 % (рисунок 1, а). Основная причина высокой ошибки для ε_{int} связана с тем, что при расчете общей емкости структуры как последовательного соединения емкостей слоев, описываемого уравнением модели [2] $1/C = t_{fe} / (\varepsilon_0\varepsilon_{fe}) + t_{int} / (\varepsilon_0\varepsilon_{int})$, толщина

интерфейсного слоя ($t_{int} \approx 1$ нм) на порядок меньше толщины сегнетоэлектрика ($t_{fe} \approx 10$ нм), и свободный член регрессии, определяющий ε_{int}, оказывается крайне чувствительным к шуму при экстраполяции к нулевой толщине (рисунок 1, б). Параметры N_{depl} и Q_{fix} слабо идентифицируемы вследствие подавления вклада нелинейной емкости обедненных областей линейными емкостями сегнетоэлектрического и интерфейсного слоев.



а б

Рисунок 1. Результаты статистического анализа: распределение средней относительной ошибки извлечения параметров (а); зависимость обратной удельной емкости от толщины сегнетоэлектрического слоя для исходных и зашумленных (3 независимых реализации) данных (б)

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, стандартный набор характеристик обеспечивает возможность однозначного определения параметров переключения поляризации и токов утечки согласно модели *Heracles*. Емкостные параметры интерфейсного и обедненного слоев являются слабо идентифицируемыми и рекомендуются к фиксации на основе данных приборного моделирования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках гранта БРФФИ Т25МЭ-042.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ferroelectricity of hafnium oxide-based materials: Current status and future prospects from physical mechanisms to device applications / W. Yang, C. Yu, H. Li [et al.] // Journal of Semiconductors. – 2023. – Vol. 44, № 5. – P. 053101.

[2] Heracles: A HfO_2 Ferroelectric Capacitor Compact Model for Efficient Circuit Simulations / L. Fehlings, M.H. Ali, P. Gibertini [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2025.

[3] Compact model parameter extraction via derivative-free optimization / R.P. Martinez, M. Iwamoto, K. Woo [et al.] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 123224-123235.

STATISTICAL ANALYSIS OF PARAMETER IDENTIFIABILITY FOR COMPACT MODELS OF HAFNIUM OXIDE-BASED FERROELECTRIC CAPACITORS

P.E. Novikov, V.R. Stempitsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
p.novikov@bsuir.by

Abstract: a statistical analysis of the parameter extraction procedure for physics-based compact models of hafnium oxide ferroelectric capacitors is presented. Using the Monte Carlo method and 2 % Gaussian noise, it is shown that polarization switching and leakage current parameters are extracted with a mean absolute percentage error below 2.1%. Capacitive parameters, including interface permittivity and depletion carrier density, exhibit errors from 15% to 86%. Fundamental causes of weak identifiability are identified: instability of inverse capacitance linear regression extrapolation at small interface thicknesses, and the masking effect of linear capacitances on the nonlinear depletion capacitance peak. Recommendations for fixing weakly identifiable parameters are proposed.

Keywords: ferroelectric memory, hafnium oxide, compact model, parameter extraction, Monte Carlo method, Verilog-A, FeRAM.