



Міністерство освіти і науки України,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,
Українська технологічна академія,
Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки,
Національний технічний університет України «КПІ імені Сікорського»,
Вінницький національний технічний університет,
Міжнародне відділення Інституту інженерів по електротехніці і радіоелектроніці IEEE



МАТЕРІАЛИ XX НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

Вимірювальна та
Обчислювальна
Техніка у
Технологічних
Процесах

Міністерство освіти і науки України,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,
Українська технологічна академія,
Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки,
Національний технічний університет України «КПІ імені Сікорського»,
Вінницький національний технічний університет,
Міжнародне відділення Інституту інженерів по електротехніці і радіоелектроніці IEEE

XX ЮВІЛЕЙНА

МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

"ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ" (ВОТТП-2020)

26 – 29 червня 2020

Одеса 2020

Склад організаційно-програмного комітету МНТК ВОТТП 19-2019

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

П.П. Воробієнко, - професор, д.т.н., член-кор. НАПН України, ректор ОНАЗ ім.О.С. Попова –*голова оргкомітету*;

Є.В. Васіліу - професор, д.т.н. лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки – *заступник голови оргкомітету*;

Члени оргкомітету:

Т.В. Борботько (Білорусія, Мінськ);
Бубулис Алгимантас, (Литва);
Вільям Кей Джі (Республіка Корея)
Натріашвілі Тамаз Мамісвич, (Грузія)
М.Н. Гладков (National Instruments)
В.Б. Дудикевич (Україна, Львів)
Т.А. Цалієв (Україна, Одеса)
Е.О. Сукачов (Україна, Одеса)
М.П. Дивак (Україна, Тернопіль)
Жултовський Богдан, (Польща)
В.Г. Здоренко (Україна, Київ)
С.М. Злепко (Україна, Вінниця)
В.Г. Каплун (Україна, Хмельницький)
В.А. Каптур (Україна, Одеса)
В.М. Кичак (Україна, Вінниця)
В.Т. Кондратов (Україна, Київ)
Є.В.Коробко (Білорусія)
І.В. Кузьмін (Україна, Вінниця)
Я.І. Лепіх (Україна, Одеса)
А.О. Мельник (Україна, Львів)
С.В. Павлов (Україна, Вінниця)

О.М. Петренко (Англія, Лоднон)
С.К.Підченко (Україна, Хмельницький)
Попов Валентин, (Німеччина);
О.П. Пунченко (Україна, Одеса)
В.П. Ройзман (Україна, Хмельницький)
О.Н. Романюк (Україна, Вінниця)
В.В. Романюк (Україна, Хмельницький)
О.П. Ротштейн (Ізраїль, Єрусалим)
В.П. Тарасенко (Україна, Київ)
А.В.Толбатов (Україна, Суми)
Ю.М. Туз (Україна, Київ)
В.В.Себко (Україна, Харків)
М.М. Сурду (Україна, Київ)
П.М. Сопрунюк (Україна, Львів)
О.П. Стахов (Канада)
Й.І. Стенцель (Україна, Северодонецьк)
В.Ю. Цветков (Білорусія, Мінськ);
О.Б. Шарпан (Україна, Київ);
К.Л. Шевченко (Україна, Київ).
Мансуров Тофік Магомедович, (Азербайджан)

ЛОКАЛЬНИЙ ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Сідень С.В., н.с. НДЦ ТКС та МЗ, відповідальний за наукову роботу в ННІ КБК і РТ;

Пилявський В.В., с.н.с. НДЦ ТКС та МЗ,

Члени локального організаційного комітету:

Гофайзен О.В., д.т.н., проф., завідувач кафедри телебачення та радіомовлення;

Захарченко М.В., д.т.н., проф. кафедри кібербезпеки та технічного захисту інформації;

Вакарчук А.О., к.т.н., заступник директора навчально-наукового інституту кібербезпеки, комп'ютерних і радіо технологій;

Стайкуца С.В., к.т.н., доц. кафедри кібербезпеки та технічного захисту інформації;

Кільдішев В.Й., к.т.н., доц. кафедри кібербезпеки та технічного захисту інформації;

Севаст'єв С.О., ст. викл. кафедри кібербезпеки та технічного захисту інформації.

Буюклі Ю.Б., директор бази відпочинку «Електрон».

Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали дев'ятнадцятої міжнародної науково-технічної конференції (м. Одеса, 26-29 червня 2020 р., м. Одеса), Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова. – Одеса: ФОП Бондаренко М. О., 2020. – 150 с.

ISBN 966-978-

У збірнику опубліковані матеріали українських та зарубіжних авторів, які висвітлюють проблеми та аспекти використання вимірювальної та обчислювальної техніки в різних галузях економіки та технологічних процесах. УДК 681.2+004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТИ ФРАКТАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО ПОЛУПРОВОДНИКА В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Онуфриенко В.М., Снижко Н.В. Антоненко Н.Н.
кафедра высшей математики
Национальный университет «Запорізька політехніка»
onvm@i.ua

Анотація - Представлена теоретическая модель оценки измеренных данных об емкостных и скейлинговых свойствах естественных или искусственно созданных образцов. Геометрические и физические свойства таких образцов моделируются вводом в рассмотрение физических фрактальных зарядов (токовых элементов), проявляющихся в сегнетоэлектрическом и полупроводниковом метаматериале. Определена связь скейлинговых свойств образца из метаматериала с проявлением гистерезиса измеряемых значений емкости.

Ключові слова: фрактальная емкость, полупроводниковый метаматериал, скейлинговый показатель, гистерезис пространственных компонент

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития современной электроники стало изучение метаматериалов в полосах частот, где возникают новые эффекты в устройствах с полупроводниковой средой и распределенными отрицательными емкостями и индуктивностями [1].

С помощью СВЧ методов измерения могут быть определены удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость полупроводника, время жизни, подвижность, эффективная масса носителей заряда, скорость поверхностной рекомбинации, толщина полупроводниковых слоёв и другие параметры.

В этой статье мы рассматриваем изменения заряда и емкости фрактально сконфигурированной области полупроводника под действием электрического поля.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Построение фрактальной модели моделирования емкостей полупроводников осуществимо путем введения в рассмотрение дифференциальной альфа-формы физических зарядов (элементов тока) в сегнетоэлектрическом и полупроводниковом метаматериале [2].

Как и в классическом случае, мы определяем плотность зарядов в полупроводнике по сумме электронных зарядов (n), дырок (p) и ионизованных примесей (N) [3]: для невырожденного полупроводника

$$\rho(x) = q(-n + p + N), \quad n = n_i \exp[-\beta(\varphi_F - \varphi)],$$

$$p = n_i \exp[\beta(\varphi_F - \varphi)], \quad (1)$$

здесь $\beta = q/(kT)$, n_i – концентрации носителей в полупроводнике, $N = -2n_i \operatorname{sh}(\beta\varphi_F)$, φ_F – отсчитываемый от уровня Ферми в образце потенциал.

Распределение плотности заряда по координате x во фрактальной среде

$$\rho(x) = 2qn_i[\operatorname{sh}\beta(\varphi_F - \varphi) - \operatorname{sh}\beta\varphi_F] \quad (2)$$

удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\frac{d}{dx} \frac{d^\alpha u}{dx^\alpha} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s} = \frac{1}{L_D^2} [\operatorname{sh}u_F - \operatorname{sh}(u_F - u)]; \quad (3)$$

$L_D = \sqrt{\varepsilon_s/(2\beta q n_i)}$ – дебаевская толщина экранирования, ε_s – проницаемость полупроводника, $u_F = \beta\varphi_F$, $u = \beta\varphi$.

После интегрирования уравнения Пуассона мы получаем

$$D_x^\alpha u = \pm \frac{\varepsilon_s}{\beta} \frac{Q_1(u_s, u_F)}{L_D}; \quad (4)$$

$$Q_1(u_s, u_F) = \frac{\sqrt{2}}{L_D} \sqrt{u_s \operatorname{sh}u_F + \operatorname{ch}(u_F - u_s) - \operatorname{ch}u_F}.$$

Электрическое поле на поверхностях полупроводника $E_s^{(\alpha)} = -\frac{1}{\beta}(D_x^\alpha u)|_s$ и суммарный заряд на поверхности полупроводникового образца $Q_s^{(\alpha)} = -\varepsilon_s E_s^{(\alpha)}$ рассчитывается с учетом полученных уравнений (согласно теореме Гаусса).

Плотность заряда на фрактальной границе определяется после интегрирования (4) от $x = 0$ до x :

$$\pm \int_{u_s}^u \frac{du}{Q_1(u, u_F)} = \frac{x^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)}. \quad (5)$$

Объемный заряд $Q_s^{(\alpha)}$ полупроводника, размер которого зависит от степени фрактализации и напряжения смещения V_G на металлическом электроде, приводит к зависимости совокупной емкости $C_t^{(\alpha)} = dQ_G/dV_G$ на единицу площади структуры от того, где находится заряд $Q_G = -Q_s^{(\alpha)} - Q_{ss}$. Это яв-

ляется базовым фактом метода изучения металл-оксид-полупроводниковых структур и применяется нами в дальнейшем для определения емкости фрактальных метаматериалов.

Для довольно низкой частоты небольшого переменного сигнала, приложенного к образцу, измеренная емкость практически совпадает с емкостью фрактального оксида

$$C_t \approx C_0 = \varepsilon_{0x}^{(\alpha)} / x_0, \quad \varepsilon_{0x}^{(\alpha)} = \varepsilon_{0x} / \left(\frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} x_0^{\alpha-1} \right) \quad (6)$$

(ε_{0x} - диэлектрическая постоянная, x_0 - толщина слоя).

Для низкочастотного сигнала и увеличения напряжения смещения суммарная емкость моделируется последовательно включенными конденсаторами C_0 и $C_s^{(\alpha)}$ (емкость поверхностных состояний $C_{ss} = -dQ_{ss} / d\varphi_s = 0$):

$$\frac{C_t^{(\alpha)}}{C_0} = \left(1 + \frac{C_0}{C_s} \right)^{-1};$$

$$C_s^{(\alpha)} = -\beta \frac{dQ_s^{(\alpha)}}{du_s} = \frac{\varepsilon_s q}{Q_s^{(\alpha)}} [N + 2n_i \operatorname{sh}(u_F - u_s)]. \quad (7)$$

На высоких частотах, когда величина емкости полупроводника $C_s^{(\alpha)} = -\frac{dQ_s^{(\alpha)}}{d\varphi_s}$ определяется толщиной x_d обедненной области, проявляется фрактальная структура распределения носителей заряда, и выражения для емкости имеют вид

$$\frac{C_t^{(\alpha)}}{C_0} = \left(1 + \frac{\varepsilon_{0x} x_d^{(\alpha)}}{\varepsilon_s x_0} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Изучение гистерезиса пространственных компонент при быстром переключении системы в инверсионный режим, когда заряд инверсионного слоя не успевает сформироваться, что сопровождается возникновением переходных процессов,

$$\varphi_s^{(\alpha)} = \frac{Q_s^{(\alpha)}}{C_0} + V'_G$$

возможно с учетом и результатов интегрирования уравнения Пуассона [4]

$$\frac{C_t^{(\alpha)}}{C_0} = (1 + (-1 \pm \sqrt{1 - a_d \frac{2C_0^2 V'_G}{qN\varepsilon_s}}) / a_d)^{-1}; \quad (9)$$

$$a_d = \frac{2}{\Gamma(\beta+1)} x_d^{\beta-2}, \quad 1 < \beta \leq 2.$$

Анализ полученных результатов подтверждает значительное влияние фрактального распределения носителей заряда на емкость метаматериального образца. Для скейлинговых показателей $\alpha=1$, $\beta=2$ полученные зависимости (6)-(9) совпадают с классическими результатами [2].

Теоретически подтверждается возможность априорного определения и оценки измеряемой емкости полупроводниковых образцов, в частности, и для выявления возможностей повышения эффективности полевых транзисторов.

3. ВЫВОДЫ

Теоретическая модель применима для оценки и коррекции измеренных данных об емкостных и скейлинговых свойствах естественных или искусственно созданных образцов.

Геометрические и физические свойства образцов моделируются вводом в рассмотрение физических фрактальных зарядов (токовых элементов), проявляющихся в сегнетоэлектрическом и полупроводниковом метаматериале.

Определена связь скейлинговых свойств образца из метаматериала с проявлением гистерезиса измеряемых значений емкости.

4. ЛИТЕРАТУРА

- 1 M.Kobayashi and T.Hiramoto. On device design for steep-slope negativecapacitance field-effect-transistor operating at sub-0.2V supply voltage with ferroelectric HfO2 thin film. AIP Advances 6, 025113, 2016.
- 2 V.M. Onufrienko. Potentials of fractal charges and currents in artificial medium, RadioElectronic.Computer Science.Control, vol.1, No 1, 2004, pp. 18–21.
- 3 R. Cobbold. Theory and Application of Field-effect Transistors. Wiley-Interscience, 1970.
- 4 V.M. Onufrienko, L.M.Onufrienko. Differintegral model of field-effect transistor with fractal nanolayer of channel, in Proc. VII Intern. Scient. Pract. Conf. PREDT, Chernivtsi, Ukraine, pp.113-114.

PAPER THE CAPACITY SIMULATION OF FRACTALLY CONDUCTING SEMICONDUCTOR IN LOW AND HIGH FREQUENCIES

Onufrienko V.M., Snizhko N.V., Antonenko N.N.
Department of Higher Mathematics
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
onvm@i.ua

Abstract — The teoretical model for evaluating the measured data on the capacitive and scaling properties of natural or artificially created samples is presented. The geometric and physical properties of such samples are modeled by introducing physical fractal charges (current elements) into consideration, which are manifested in the ferroelectric and semiconductor metamaterial. The relationship of the scaling properties of the metamaterial sample with the manifestation of a hysteresis of the measured capacitance values is determined.

Key words: fractal capacity, semiconductor metamaterial, scaling indicator, spatial components hysteresis.