

СЕКЦІЯ «ВИЩА МАТЕМАТИКА»

УДК 517.9

Онуфрієнко В.М.¹, Слюсарова Т.І.²

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² асист. НУ «Запорізька політехніка»

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРОБІЙ ФРАКТАЛЬНОГО КАНАЛУ ПОЛЬОВОГО НАНОТРАНЗИСТОРА

Зменшення довжини каналу метало-діелектричних напівпровідникових транзисторів сприяє підвищенню питомої крутизни вольт-амперних характеристик та граничної частоти. Коли поздовжні розміри напівпровідних структур досягають значень 1-2 мкм, ці закономірності перестають виконуватись. При цьому, якщо дизайн і трактування електростатичних закономірностей мало змінились за останні десятиліття, то фізична природа і характер переносу електронів суттєво змінюється на фоні зменшення довжини каналу провідності нанотранзистора, спостерігається зміна і форма вольт-амперної характеристики [1], що відбувається також і при зменшенні інших топологічних розмірів. Значну роль у побудові теорії відіграє нефостеровість фрактальних елементів, що проявляється у їх здатності створювати від'ємні характеристики ємності або індуктивності у локальному масштабі [2] за рахунок виникнення негативного зворотного зв'язку.

Побудову фрактальної моделі імітації нефостерівського наношару окислу на межі метал-напівпровідник у просторі як функції множини здійснюємо вводом у розгляд основних положень теорії фрактального шару на межі розділу двох середовищ: визначення дробового диференціала

$$d^\alpha x = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \cdot \frac{dx}{(t-x)^{1-\alpha}}, \quad \text{його зв'язку з дробовою похідною}$$

$$d^\alpha L(x) = {}_a D_{x_i}^\alpha L(x) d^\alpha x$$
, де дробова похідна ${}_a D_{x_i}^\alpha L(x)$ використовується у формі Рімана-Ліувілля. Для фрактально конфігурованого інверсійного шару з товщиною x_d у площині xOy та щільності струму $j(x, y)$ моделюємо

струм стоків як
$$I_D^{(\alpha)} = a \cdot \int_0^{x_d} j(x, y) d^\alpha x.$$

З урахуванням у моделі фрактальності по y маємо вираз для щільності

струму
$$j^{(\alpha)}(x, y) = -e \cdot \mu_n \cdot n \cdot \frac{dV(y)}{dy}, \quad \int_0^{x_d} e \cdot \mu_n \cdot n \cdot d^\alpha x = \mu_n^* \cdot Q_n^{(\alpha)}(y),$$

$$I_D^{(\alpha)} = -\mu_n^* \cdot a \cdot Q_n^{(\alpha)}(y) \cdot \frac{dV(y)}{dy}. \quad (1).$$

Коли напруга стік-витік V_{DS} перевищує напругу перекриття V'_{DS} , приповерхневу область напівпровідника можна подати у вигляді зворотнорозміщеного $n^+ - p$ -переходу, до якого прикладено напругу $V_{DS} - V'_{DS}$ [1]. Довжина області перекриття l_s та співвідношення між товщиною області просторового заряду l та ефективною довжиною каналу l_e :

$$l_s^\alpha = l^\alpha - l_e^\alpha \approx \sqrt{k_s \cdot (V'_{DS} - V_{DS})}, \quad k_s = 2 \cdot \varepsilon_s / (q \cdot N). \quad (2)$$

З урахуванням (2) та узагальненого принципу подібності для фрактально конфігурованих структур $\frac{I_D^{(\alpha)}}{I_D} = \left(\frac{l}{l_e}\right)^\alpha$ зв'язок струму стоку $I_D^{(\alpha)}$ зі струмом I_D , що є відповідним напрузі перекриття V'_{DS} , отримуємо співвідношення

$$\frac{I_D}{I_D'} = \left(\frac{l}{l_e}\right)^\alpha, \quad I_D = I_D' \left(\frac{l}{l - \sqrt{k_s \cdot (V'_{DS} - V_{DS})}} \right)^\alpha. \quad (3)$$

Теоретично підтверджується сильний вплив скейлінгу каналу на перебіг стоккових характеристик транзистора, що пояснюється фрактальністю каналу і механізмами, що викликають швидке зростання струму за великих V_{DS} : лавинне розмноження носіїв у каналі за рахунок ударної іонізації і пробій переходу стік-підкладка. Помічено значний вплив на зсув порогових значень пробивної напруги V_B в умовах «м'якого» та «різкого» пробію, що мотивується фрактальною конфігурацією переходів стік-підкладка. Якщо довжина каналу мала, а підкладка має малий скейлінг фракталізації, то границя переходу стік-підкладка знаходиться поблизу витоку, у зв'язку з чим виникає пробій стік-витік («прокол»). При цьому порушується наближений лінійний зв'язок між вихідною провідністю і струмом стоку, що спостерігається і експериментально підтверджується для класичних польових транзисторів [1].

Теоретичні результати дослідження вказують на необхідність урахування виявлених фактів у впровадженнях розглянутої структури транзистора з

фрактальною конфігурацією каналу у складі напівпровідникових інтегральних мікро- і наносхем пристроїв дробового інтегродиференціювання в адаптивних системах, програмованих аналогових інтегральних схемах, фільтрах, розв'язувачах диференціальних рівнянь дробового порядку тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cobbold R. Theory and Application of Field-effect Transistors / R. Cobbold. – Wiley-Interscience, 1970. – 534 p.
2. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // IEEE: Proceedings 15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2020. – P. 586–589.