

## МЕТОДИ ТЕОРІЇ ЗБУРЕНЬ У МОДЕЛЮВАННІ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВОГО P-I-N-ДІОДА (ГІДРОДИНАМІЧНЕ НАБЛИЖЕННЯ)

Андрій Бомба<sup>1</sup>, Ігор Мороз<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, м. Півне, [abomba@ukr.net](mailto:abomba@ukr.net)

<sup>2</sup>Рівненський державний гуманітарний університет, м. Півне, [igor\\_moroz@yahoo.com](mailto:igor_moroz@yahoo.com)

Запропоновано методику математичного моделювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникового об'ємного p-i-n-діода (рис. 1, схематичне зображення (a), геометрія задачі (b)), що ґрунтується на системному підході до вивчення досліджуваного електронного пристрою та проведенні аналізу фізичних процесів у ньому методами теорії збурень. Стационарні процеси протікання струму під дією прикладеної різниці потенціалів у високолегованих, контактних та активній областях діода розглядаються в гідродинамічному наближенні. Моделювання ВАХ зводиться до пошуку розподілів концентрацій носіїв заряду та потенціалу в структурних елементах досліджуваної системи. Основу математичної моделі складає традиційна нелінійна сингулярно збурена система рівнянь неперервності електронно-діркових струмів та рівняння Пуассона з відповідними граничними умовами [1,2,6]. Особливостями запропонованого підходу є подання розв'язку поставленої нелінійної задачі у вигляді асимптотичних рядів, які будуються шляхом використання методу примезових поправок теорії збурень [1,3-6], та врахування впливу бар'єрів (p-i-, n-i- переходів) [7] на формування електронно-діркової плазми в активній області p-i-n-діода.

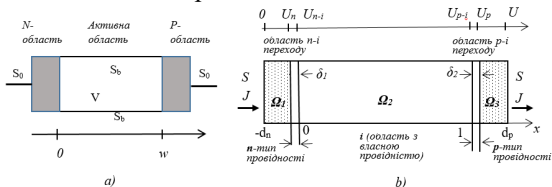
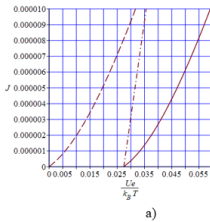


Рис.1.

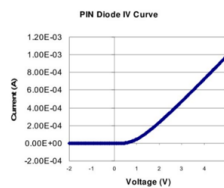
Застосування методу примезових поправок теорії збурень забезпечило можливість уточнити розподіли концентрацій носіїв заряду в зонах p-i- та n-i- контактів (у порівнянні із результатами досліджень, що виконувались межах наближення амбіполарної дифузії [2]) і, що важливо, виокремити розподіл електростатичного поля в активній області діода, яке в основному формується зарядами, які зосереджені у зонах контактів.

Застосовані у дослідженні методи забезпечують проведення декомпозиції вихідної задачі так, що отримані підзадачі мають нижчий рівень складності (вони є лінійними) та відповідне фізичне трактування. Зокрема, примезові поправки описують розподіли концентрацій носіїв заряду в так званих областях просторового заряду (ОПЗ) поблизу n-i- та p-i- контактів

структури, які (у свою чергу) породжують електростатичне поле у досліджуваній області і відповідне падіння потенціалу. Відмітимо, що заряд ОПЗ відіграє суттєву роль у формуванні уявної частини імпедансу структури. Регулярні складові розв'язку задачі описують властивості електронно-



a)



b)

Рис. 2.

діркової плазми активної області і, в основному, - дійсну частину імпедансу.

Проведено серію комп'ютерних експериментів (а), результати яких корелюються із відомими даними експериментальних досліджень (b) (рис. 2), розкриваючи суть останніх.

1. Bomba A., Moroz I. Analysis of Nonlinear Processes in the P-I-N Diodes Plasma by the Perturbation Theory Methods // ACIT-2023 Conference Proceedings, Wroclaw, Poland. – P. 117-120.
2. Sze S., Kwok K. Physics of Semiconductor Devices. – New York: Wiley-Interscience, 2006. – 815 p. Doi: <https://doi.org/10.1002/0470068329>
3. Vasil'eva A.B., Butusov V.F., Kalachev L.V. The Boundary Function Method for Singular Perturbation Problems. – SIAM, Philadelphia, 1995.
4. Smith D.R. Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985. – 520 p.
5. Белянин М.П. Об асимптотическом решении одной модели p-n- перехода // Вычислительная математика и математическая физика. – 1986. – Т. 26. – №2. – С.306-311.
6. Бомба А.Я., Мороз І.П. Моделювання розподілу носіїв заряду в активній області p-i-n-структур методами теорії збурень // Вісник НУВГП. Серія: Технічні науки. – Рівне. – Вип. 1(97). – 2022. – С. 291-306.
7. Пека Г.П., Стрїха В.І. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках. – К.: Либідь, 1992. – 240 с.

#### PERTURBATION THEORY METHODS IN A SEMICONDUCTOR P-I-N DIODE CHARACTERISTICS MODELING (HYDRODYNAMIC APPROXIMATION)

*A methodology for mathematical modeling of the current-voltage characteristics (CVC) of a semiconductor bulk p-i-n diode based on a systematic approach to investigate the electronic device under study and analyzing the corresponding physical processes using perturbation theory methods is proposed. Modeling the CVC comes down to searching for the distributions of charge carrier concentrations and potential in the structural elements of the studied system. The basis of the mathematical model is the traditional nonlinear singularly perturbed system of the continuity equations for electron-hole currents and the Poisson's equation with the corresponding boundary conditions. Features of the proposed approach are the representation of the posed nonlinear problem solution in the form of asymptotic series, which are constructed by using the method of boundary corrections.*