

ЕФЕКТИВНА ПРОВІДНІСТЬ ТРИФАЗНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Бабиченко С.В.

e-mail: serhii.babychenko@nure.ua

Науковий керівник – к.ф.-м.н., доц. Галат О.Б.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП
м. Харків, Україна

This paper analyzes the effective electrical conductivity of three-phase heterogeneous semiconductor structures using the Bruggeman effective medium approach. The model accounts for the influence of depolarization factors, geometrical characteristics of inclusions, and percolation effects on charge transport. A composite system consisting of a crystalline semiconductor matrix and amorphous inclusions of different geometry is considered. The roles of inclusion shape, volume fraction, and connectivity in forming conductive paths are discussed. The presented approach enables estimation of macroscopic electrical properties of complex composite materials.

Сучасні напівпровідникові матеріали та середовища мають складну мікроструктуру, що може включати кілька фаз із різними електричними властивостями (кремнієві гетероструктури, тонкоплівкові фотопровідні і композитні матеріали). Їх електричні властивості визначаються не лише провідністю окремих фаз, але й їх просторовим розподілом, геометрією включень та перколяційними ефектами.

Метою роботи є дослідження ефективної електропровідності трифазних напівпровідникових гетероструктур на основі моделі Бруггемана з урахуванням впливу форми включень, їх концентрації, провідності на макроскопічні транспортні властивості системи [1,2].

В рамках такого підходу ефективна провідність композитної системи визначається з умов електростатичної самоузгодженості, що забезпечує баланс електричних полів у різних фазах матеріалу. Для багатофазної системи загальне рівняння Бруггермана має вигляд

$$\sum_{j=1}^n f_j \frac{\sigma_i - \sigma_{eff}}{\sigma_{jeff} + K_i(\sigma_i - \sigma_{eff})} = 0,$$

де f_i – об’ємна частка i -го компонента, σ_i – його електропровідність, K_i – коефіцієнт, що враховує деполяризаційні, геометричні та перколяційні фактори, σ_{eff} – ефективна провідність. Застосування цієї моделі дозволяє враховувати вплив різних структурних факторів на транспорт заряду в неоднорідному матеріалі. Особливу роль у формуванні електричних властивостей подібних систем відіграють деполяризаційні, геометричні фактори та перколяційні явища.

Деполаризаційні фактори виникають через перерозподіл електричного поля в неоднорідному середовищі, коли провідність включень відрізняється від провідності матриці. Унаслідок цього локальне поле всередині включення залежить від форми частинок і співвідношення провідностей фаз. Ефект описується деполаризаційним коефіцієнтом L , що характеризує екранування поля. Для сферичних включень $L = 1/3$, тоді як для витягнутих (зокрема циліндричних) уздовж осі $L \rightarrow 0$, що сприяє формуванню провідних шляхів і підвищує їх внесок у ефективну провідність системи [2].

Важливим чинником є геометрія включень. Форма, розмір і орієнтація включень можуть суттєво змінювати електричні властивості матеріалу. Сферичні включення створюють переважно ізотропний вплив на електричне поле та забезпечують подібний внесок у провідність у всіх напрямках. Натомість витягнуті структури, зокрема циліндричні включення, здатні формувати канали провідності, що призводить до анізотропії електричних властивостей. Навіть за невеликих концентрацій такі включення можуть створювати ефективні шляхи транспорту заряду [3].

Важливий механізм, що визначає електропровідність багатокомпонентних матеріалів – перколяційні явища. Перколяція пов'язана з формуванням безперервної мережі провідних каналів у системі. Якщо об'ємна частка включень менша за перколяційний поріг, вони залишаються ізольованими, і струм проходить переважно через менш провідну матрицю. Коли концентрація перевищує критичне значення, формується безперервний провідний кластер, що забезпечує ефективний транспорт заряду. Поблизу перколяційного порогу провідність різко зростає та описується степеневою залежністю [4].

Для випадку трифазних напівпровідникових гетероструктур, котрі включають кристалічну матрицю з аморфними включеннями сферичної та циліндричної форми рівняння Бруггермана має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{f_c(\sigma_c - \sigma_{eff})}{\sigma_{eff} + K_c(\sigma_c - \sigma_{eff})} + \frac{f_{sph}(\sigma_a - \sigma_{eff})}{\sigma_{eff} + K_s(\sigma_a - \sigma_{eff})} + \\ & + \frac{f_{cyl}(\sigma_a - \sigma_{eff})}{\sigma_{eff} + K_{cy}(\sigma_a - \sigma_{eff})} \end{aligned} \right\} = 0,$$

де $f_c + f_s + f_{cy} = 1$ – об'ємні частки кристалічної фази, сферичних та циліндричних аморфних включень; σ_c – провідність кристалічної фази; σ_a – провідність аморфної фази (беремо однакову для обох типів включень).

На рисунку 1 наведено залежності ефективної провідності подібної напівпровідникової структури від об'ємних часток сферичних та циліндричних аморфних включень для різних значень σ_a ($1 - \sigma_a = 10^{-5} \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$, $2 - \sigma_a = 10^{-4} \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$, $3 - \sigma_a = 10^{-3} \frac{\text{СМ}}{\text{М}}$).

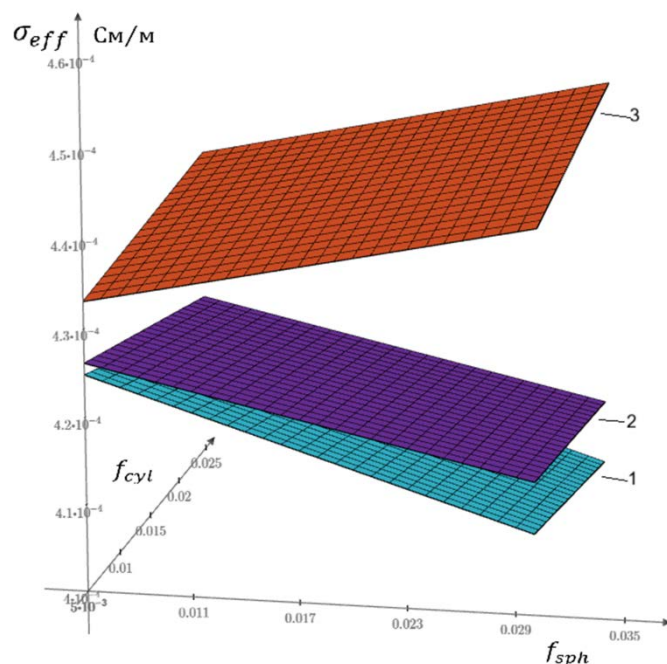


Рисунок 1 – Залежності $\sigma_{eff} = f(f_{sph}, f_{cyl})$
за умови $L_c = L_{sph} = \frac{1}{3}, L_{cyl} = 1$

З рисунку 1 видно, що ефективна електропровідність трифазної напівпровідникової структури суттєво залежить від об'ємних часток сферичних та циліндричних аморфних включень. Зі збільшенням провідності аморфної фази підвищується загальний рівень ефективної провідності.

Таким чином, використання ефективно-середовищних моделей дозволяє враховувати основні структурні параметри гетерогенних систем і здійснювати оцінку їх макроскопічних електричних властивостей. Отримані результати можуть бути використані для аналізу та моделювання електричних характеристик напівпровідникових матеріалів і гетероструктур, що застосовуються в сучасній електроніці та оптоелектроніці.

Список використаних джерел:

1. Electrical resistivity of composites. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb07576.x> (дата звернення: 01.30.2026).
2. Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties. URL: <https://torquato.princeton.edu/book-random-heterogeneous-materials/> (дата звернення: 01.30.2026).
3. Applications of Percolation Theory. URL: https://lib.ysu.am/disciplines_bk/f24323bfc87c7b8362c4993949f2f8b1.pdf (дата звернення: 01.30.2026).
4. Modeling and simulation of dielectric heterostructures. URL: Modelling and simulation of dielectric heterostructures: a physical survey from an historical perspective | Semantic Scholar (дата звернення: 01.30.2026).