

УДК 621.38-022.53:004.891.3

**ЗАСТОСУВАННЯ НЕІНВАЗИВНОГО
НВЧ-ФОТОМОДУЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
РЕКОМБІНАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В НАПІВПРОВІДНИКАХ РІЗНОЇ
КРИСТАЛІЧНОЇ СТРУКТУРИ**

Галат О.Б., Бабиченко С.В.

e-mail: serhii.babychenko@nure.ua

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

The study presents a comparative analysis of the calculated phase shift of the photoconductivity signal for different types of semiconductor materials, including monocrystalline (Si, GaAs), polycrystalline (poly-Si, CdTe), and amorphous (a-Si) structures. The influence of crystalline structure, defect density, and carrier recombination mechanisms is investigated. The dependence of the phase shift on the excitation wavelength is examined, enabling the evaluation of key material parameters such as carrier lifetime, surface recombination velocity, and the efficiency of carrier generation and transport in various structures. The obtained results can be utilized to optimize the manufacturing technologies of photodetectors and improve the performance of semiconductor sensors.

Підвищення ефективності методів і засобів контролю якості напівпровідникових матеріалів відіграє важливу роль у розвитку технологій їх виробництва. Вдосконалення цих методів дозволяє підвищити точність, продуктивність і надійність виробничих процесів. Це сприяє створенню більш якісних і передових напівпровідникових матеріалів для сучасних технологій. Методи та засоби контролю електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів і структур мають відповідати сучасним вимогам. Вони повинні бути безконтактними та неруйнівними. Важливими характеристиками є локальність вимірювань і можливість одночасного визначення кількох параметрів.

Відповідно, необхідність стовідсоткового вхідного, міжопераційного та вихідного контролю напівпровідникових матеріалів на різних етапах виробництва мікроелектроніки зумовлена зростаючими вимогами до якості, надійності та стабільності параметрів готових напівпровідникових чипів різного призначення. Для забезпечення цього необхідно оцінювати такі параметри, як електропровідність, рухливість носіїв заряду, концентрація домішок, товщина та однорідність шарів, рівень залишкових напруг, спектральні характеристики, теплопровідність, діелектричні втрати, дефектність структури, радіаційна стійкість та термічна стабільність.

Одним із широко застосовуваних методів визначення рекомбінаційних параметрів напівпровідникових матеріалів є НВЧ-фотомодуляційний метод [1]. Він ґрунтується на аналізі залежності сигналів фотопровідності в умовах зовнішнього високочастотного зміщення, що

зумовлюється електрофізичними характеристиками досліджуваного зразка. Суть методу полягає у вимірюванні фазового зсуву сигналу фотопровідності на двох частотах модуляції інтенсивності світлового випромінювання за умов слабого та сильного поглинання випромінювання досліджуваним зразком. Перевагою методу є можливість реєстрації низьких сигналів фотопровідності шляхом їх підсилення на частоті модуляції та локальність контролю. Перше забезпечується модуляційним способом формування сигналів, а друге – локалізованим освітленням області зразка для модуляції фотопровідності.

У роботі досліджується методика визначення фундаментальних електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів, зокрема часу життя носіїв заряду та швидкості їхньої поверхневої рекомбінації для монокристалічних (Si, GaAs), полікристалічних (poly-Si, CdTe), аморфних (a-Si) напівпровідників. Аналіз здійснюється шляхом вивчення спектральних залежностей фазового зсуву сигналу фотопровідності відносно збуджуючого випромінювання. Дослідження охоплює широкий діапазон довжин хвиль освітлення зразка, що забезпечує комплексну оцінку динаміки носіїв заряду та механізмів рекомбінаційних процесів у матеріалі.

Спектральна залежність фазового зсуву сигналу фотопровідності визначається шляхом розв'язання одномірного рівняння неперервності [1-3]. Це рівняння формулюється для режиму слабого гармонійно модульованого фотозбудження, коли амплітуда оптичного впливу є достатньо малою, щоб не призводити до нелінійних ефектів у системі. Такий підхід дозволяє врахувати основні механізми генерації, рекомбінації та дифузії носіїв заряду, що забезпечує точний опис фазового зсуву сигналу фотопровідності залежно від спектральних характеристик збуджуючого випромінювання.

$$\frac{\partial \cdot \Delta p}{dt} = D \frac{\partial^2 \cdot \Delta p}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau} + g_0(\lambda) \cdot [1 - \exp \exp(j\Omega t)] \cdot \exp \exp(-\alpha(\lambda) \cdot x),$$

де Δp – концентрація надлишкових дірок; D – коефіцієнт дифузії; Ω – частота модуляції потоку випромінювання; $g_0(\lambda)$ – швидкість генерації електрон-діркових пар; α – коефіцієнт поглинання випромінювання напівпровідником. Приклад розрахунків фазового зсуву сигналу фотопровідності монокристалічної кремнієвої пластини товщиною 300 мкм та питомим опором 20 Ом·см наведено на рисунку 1.

Аналіз отриманих результатів демонструє можливість застосування НВЧ-фотомодуляційного методу для визначення рекомбінаційних параметрів напівпровідникових матеріалів з різною кристалічною структурою, зокрема монокристалічних (Si, GaAs), полікристалічних (poly-Si, CdTe) та аморфних (a-Si). Отримані дані свідчать про високу чутливість методу до рекомбінаційних параметрів носіїв заряду. Завдяки можливості дослідження спектральних залежностей фазового зсуву сигналу фотопровідності, метод забезпечує комплексний аналіз механізмів

рекомбінації в різних типах напівпровідників. Це дозволяє не лише оцінювати якість матеріалів, а й оптимізувати їх виробництво, покращуючи характеристики фоточутливих приладів, сенсорів і компонентів мікроелектроніки.

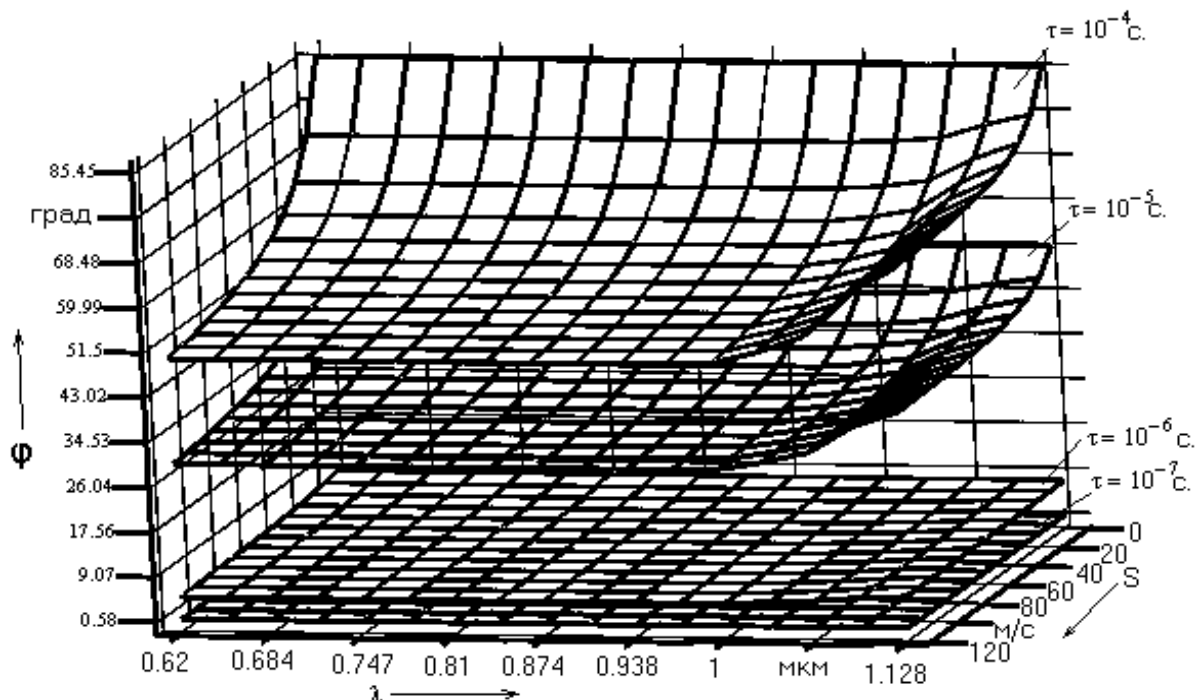


Рисунок 1

Таким чином, результати дослідження підтверджують перспективність використання НВЧ-фотомодуляційного методу для контролю рекомбінаційних параметрів напівпровідникових матеріалів, що може сприяти вдосконаленню технологічних процесів і підвищенню якості напівпровідникових виробів.

Список використаних джерел:

1. Гордієнко Ю.О., Бородін Б.Г., Бабиченко С.В., Абу Інзех Іяд. Дослідження рекомбінаційних процесів у напівпровідниках спектральним методом. *Радіоелектроніка та інформатика*. 2002. №4. С. 36–39.
2. Babychenko, O. Sushko, O. Babychenko, S. Logunov, V. Bendeberya, H. Crystal Silicon Photoconductivity with Amorphous Inclusions. *Journal of nano- and electronic physics*. 2024. Vol.16 No 1, 01013.
3. Galat A.B., Donchenko A.L. Analytical estimation of recombination current of sharp asymmetric p - n junction. *Journal of nano- and electronic physics*. 2019. Vol. 11, No 5, 05005(8pp).