УДК 621.317.33 **DOI: 10.15330/itee.2026.4.03**

А.О. ДРУЖИНІН, д-р техн. наук, С.І. НІЧКАЛО, канд. техн. наук, Р.М. КОРЕЦЬКИЙ, канд. техн. наук, О.А. ШЕВЧЕНКО, аспірант

ОСОБЛИВОСТІ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

Вступ

Вивчення електричних властивостей ниткоподібних кристалів кремнію, легованих бором, є актуальним завданням фізики напівпровідників. Особливий інтерес становить дослідження низькотемпературних механізмів перенесення заряду, пов'язаних із локалізацією носіїв та стрибковою провідністю в домішковій підсистемі кремнію. Традиційні методи вимірювання електропровідності постійним струмом часто обмежують можливості аналізу динаміки носіїв заряду в умовах кріогенних температур. Натомість імпедансна спектроскопія дозволяє отримати інформацію про частотні особливості електричного відгуку [1, 2], пов'язані з процесами перенесення заряду та взаємодією носіїв із домішковими станами.

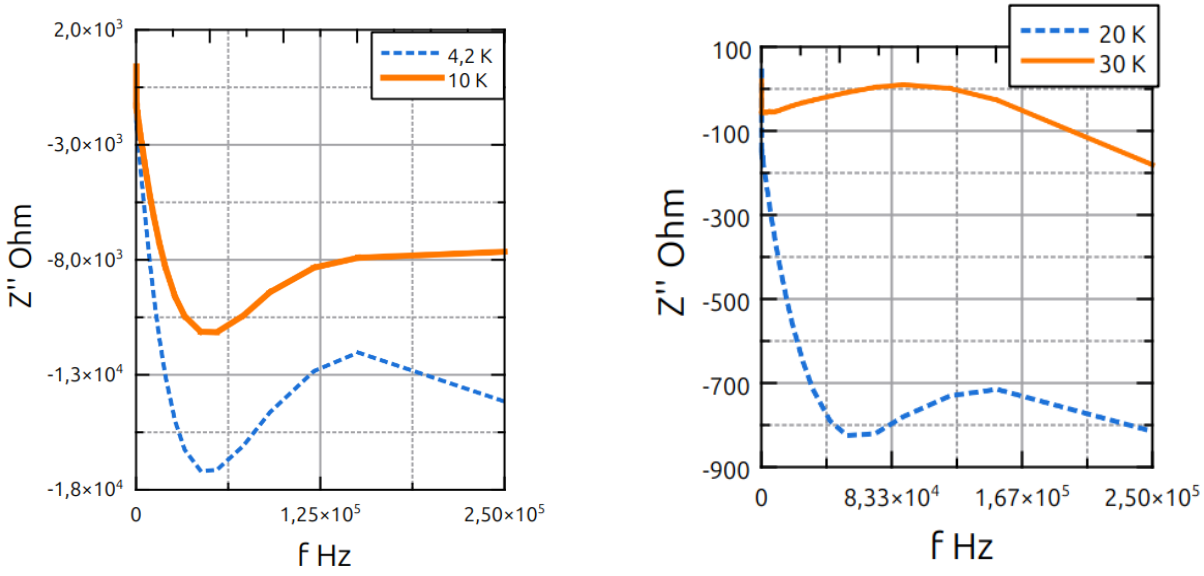
Метою цієї роботи є дослідження температурної трансформації імпедансних характеристик кремнієвих НК із фіксованою концентрацією домішки бору. У роботі проаналізовано зміну частотних залежностей реактивного опору та фазового кута в діапазоні від 4,2 К до 30 К. Особливу увагу приділено аналізу еволюції реактивної складової імпедансу, що супроводжує перехід до вищих температур. Отримані результати дозволяють уточнити фізичні механізми формування імпедансного спектра кремнієвих мікроструктур та демонструють чутливість імпедансної спектроскопії до зміни стану домішкової підсистеми, що залишається актуальним навіть при температурах, коли внесок локалізованих станів трансформується, але не зникає повністю.

Експериментальна частина

Об'єктом дослідження були ниткоподібні кристали (НК) кремнію p-типу провідності, вирощені методом хімічних транспортних реакцій (CVT) [2] у замкненому об'ємі з використанням брому як транспортного агента. Даний метод вирощування забезпечує високу структурну досконалість кристалів, що робить їх надійними модельними об'єктами для вивчення процесів переносу заряду. Досліджуваний зразок характеризувався діаметром від 20 до 40 мкм та питомим опором $\rho \approx 0.0155$ Ом·см. Для вимірювання імпедансних характеристик до торців НК було нанесено омічні контакти методом електроімпульсного мікрозварювання платинових дротів [2], що забезпечило мінімальний перехідний опір та відсутність паразитних нелінійностей у досліджуваному діапазоні температур.

Вимірювання імпедансних характеристик проводилися в інтервалі температур 4,2–30 К у кріостаті з автоматизованою системою стабілізації температури. Для реєстрації активної та реактивної складових електричного сигналу використовувався синхронний підсилювач типу Lock-in Amplifier, який забезпечував вимірювання комплексного відгуку зразка в діапазоні частот 10 Гц – 250 кГц. На основі експериментально визначених активної (Z') та реактивної (Z'') складових розраховувалися імпеданс та фазовий кут.

На рис. 1 наведено частотні залежності реактивної складової імпедансу (Z'') для зразка у діапазоні температур 4,2–30 К. У низькотемпературній області (Т < 40 К) на спектрах спостерігаються чітко виражені мінімуми, що свідчать про домінування ємнісного характеру імпедансу. Існування таких мінімумів є характерною ознакою релаксаційних процесів, зумовлених поляризацією локалізованих носіїв заряду в домішковій підсистемі кремнію. Зі зростанням температури амплітуда цих мінімумів поступово зменшується, а сама крива зміщується у бік менших значень Z''. Таку поведінку можна пов'язати зі зростанням імовірності стрибків носіїв між локалізованими станами, що призводить до часткової делокалізації носіїв та переходу системи до більш провідного стану. При температурах вище 30 К реактивний відгук значно "згладжується", що вказує на переважання активного механізму провідності над ємнісним внеском домішкових станів.



а) б)

Рис. 1. Частотні залежності реактивної складової імпедансу ниткоподібних кристалів кремнію за різних температур: а) 4.2 — 10К б) 20 — 30 К

Додаткову інформацію про характер імпедансного відгуку НК кремнію дає аналіз температурної залежності фазового кута, визначеного як різниця фаз між прикладеною напругою та струмом, що протікає через кристал. У досліджуваному температурному діапазоні спостерігається чітка еволюція фазового кута, яка корелює зі змінами реактивної складової імпедансу. При найнижчих температурах (4,2 - 10 К) фазовий кут набуває від'ємних значень, що вказує на виразний ємнісний характер відгуку системи. Це свідчить про те, що в умовах глибокого замороження носії заряду виявляються локалізованими на домішкових центрах, а перерозподіл локалізованих носіїв заряду в домішковій підсистемі домінують над активним переносом.

Зі збільшенням температури відбувається поступове зменшення за модулем від'ємних значень фазового кута. Така поведінка свідчить про зростання внеску активної складової провідності та зміну механізму перенесення носіїв заряду. При подальшому підвищенні температури в області високих частот спостерігається поява додатних значень фазового кута, що вказує на суттєву трансформацію імпедансного відгуку системи порівняно з низькотемпературним режимом. Подібна температурно-частотна трансформація фазових

характеристик спостерігалася і для інших напівпровідникових структур, досліджених методом імпедансної спектроскопії [7].

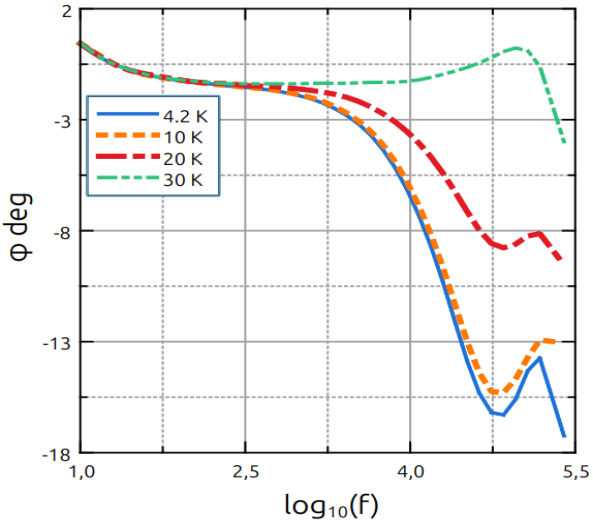


Рис. 2. Частотні залежності фазового кута ниткоподібних кристалів кремнію за різних температур

Важливо зазначити, що спостережувана трансформація фазових характеристик підтверджує припущення про зміну механізму провідності: від стрибкової провідності по локалізованих станах до механізмів, у яких внесок делокалізованих станів стає визначальним. Отримані дані демонструють, що імпедансна спектроскопія є ефективним інструментом для моніторингу стану домішкової підсистеми НК кремнію без необхідності використання складних моделей релаксації, дозволяючи візуалізувати динаміку зміни провідності за допомогою лише частотних залежностей фазового кута.

Отримані температурні та частотні залежності імпедансних характеристик НК кремнію узгоджуються з теоретичними уявленнями про стрибкову провідність у легованих напівпровідниках [4, 5]. При низьких температурах ($T < 40$ К) носії заряду знаходяться в локалізованому стані на акцепторних центрах бору. Процес перенесення заряду в такому стані забезпечується стрибками носіїв між вузлами домішкової підсистеми, що узгоджується з раніше встановленим механізмом провідності в ниткоподібних кристалах кремнію [6]. Як видно з експериментальних даних (див. рис. 1), саме в цьому діапазоні спостерігається виражений ємнісний характер імпедансу, що відповідає поляризації, зумовленій перерозподілом локалізованих носіїв під дією змінного електричного поля. Додатковим підтвердженням зміни характеру перенесення носіїв заряду є частотні залежності питомої провідності $\sigma(f)$, наведені на рис. 3. Як видно з рисунка, у низькотемпературній області провідність має слабку частотну залежність у діапазоні низьких і середніх частот, тоді як при високих частотах спостерігається її зростання. З підвищенням температури від 4,2 К до 20 К абсолютне значення питомої провідності збільшується, що свідчить про зростання внеску активного перенесення носіїв заряду. Така поведінка узгоджується з термоактивованим характером провідності в домішковій підсистемі кремнію.

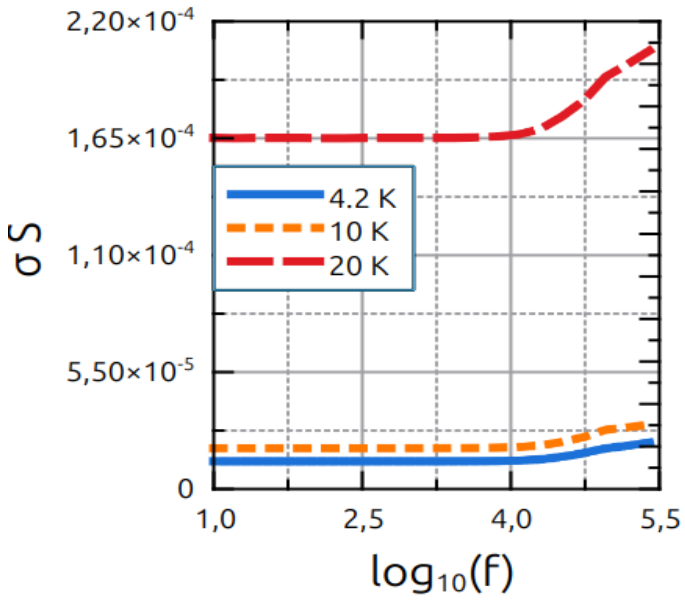


Рис. 3. Частотні залежності питомої провідності σ ниткоподібних кристалів кремнію за температур 4,2-20 К.

Згідно з моделлю Мотта частотна залежність імпедансу в режимі стрибкової провідності визначається динамікою цих стрибків. Наявність мінімумів на спектрах Z'' та зміна фазового кута безпосередньо відображають "відгук" домішкових станів на прикладену частоту. Зі зростанням температури середня енергія носіїв заряду збільшується, що полегшує їх активацію в зони провідності або розширює радіус стрибка. Це призводить до поступового переходу від чисто ємнісного відгуку (характерного для локалізованих станів) до резистивного. Таким чином, спостережувана температурна еволюція імпедансу є ознакою того, що ми фіксуємо процес делокалізації носіїв заряду та перехід від домішкового стрибкового транспорту до механізмів, де внесок делокалізованих станів стає домінуючим. Наведені результати підтверджують, що частотні залежності імпедансу НК Si є чутливим індикатором змін механізмів перенесення заряду в низькотемпературній області.

Висновки.

Досліджено частотні залежності реактивної складової імпедансу та фазового кута ниткоподібних кристалів кремнію p-типу провідності з питомим опором ρ≈0.0155 Ом·см у температурному діапазоні 4,2–30 К. Встановлено, що за низьких температур імпедансний відгук має виражений ємнісний характер, що проявляється у від'ємних значеннях реактивної складової імпедансу та фазового кута. Зі зростанням температури спостерігається зменшення за модулем реактивної складової імпедансу, згладжування характерних мінімумів на частотних залежностях та трансформація фазових характеристик. Отримані результати узгоджуються з уявленнями про перенесення заряду між локалізованими станами в легованому кремнії та свідчать про зміну співвідношення між активною та реактивною складовими імпедансного відгуку зі зростанням температури. Показано, що імпедансна спектроскопія є ефективним методом дослідження низькотемпературних процесів перенесення заряду в ниткоподібних кристалах кремнію.

Список використаних джерел.

1. E. Barsoukov and J. R. Macdonald, "Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications, 2nd ed". Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018. doi: https://doi.org/10.1002/0471716243

2. А. О. Дружинін, І. П. Островський, Ю. Р. Когут, Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці : монографія. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2010.

3. A. Lasia, “Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications”. New York, NY, USA: Springer, 2014. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8933-7.

4. N. F. Mott and E. A. Davis, “Electronic Processes in Non-Crystalline Materials”, 2nd ed. Oxford, UK: Clarendon Press, 1979.

5. B. I. Shklovskii and A. L. Efros, “Electronic Properties of Doped Semiconductors”. Berlin, Germany: Springer, 1984. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-02403-4

6. A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, R. Koretskyy, and Iu. Kogut, “Variable-range hopping conductance in Si whiskers,” *Phys. Status Solidi A*, vol. 211, no. 2, pp. 504–508, Feb. 2014. doi: https://doi.org/10.1002/pssa.201300162.

7. P. Oruç, S. Eymur, and N. Tuğluoğlu, “Investigation of Terp-Pyr/p-Si diode using complex impedance spectroscopy depending on measurement temperatures and frequencies,” J. Mater. Sci.: Mater. Electron., vol. 35, Art. no. 314, 2024. doi: https://doi.org/10.1007/s10854-024-12029-1

Надійшла до редколегії 14.05.2026

Відомості про авторів:

Дружинін Анатолій Олександрович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри напівпровідникової електроніки Національний університет «Львівська політехніка» / Lviv Polytechnic National University, Україна; email: anatolii.o.druzhynin@lpnu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9143-9443

Нічкало Степан Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри напівпровідникової електроніки, Національний університет «Львівська політехніка» / Lviv Polytechnic National University, Україна; email: Stepan.I.Nichkalo@lpnu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8455-0146

Корецький Роман Миколайович – кандидат технічних наук, асистент кафедри напівпровідникової електроніки, Національний університет «Львівська політехніка» / Lviv Polytechnic National University, Україна; email: roman.m.koretskyy@lpnu.ua

Шевченко Олег Андрійович – аспірант кафедри напівпровідникової електроніки, Національний університет «Львівська політехніка» / Lviv Polytechnic National University, Україна; email:oleh.shevchenko.asp.2025@lpnu.ua