

## **НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІ ЄМНІСНІ ЕЛЕМЕНТИ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ**

*Дружинін А. О., д.т.н., проф.; Островський І. П., д.т.н., доц.;*

*Ховерко Ю. М., к.т.н., с.н.с.; Корецький Р. М.*

*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

Ниткоподібні кристали (НК) на основі кремнію, завдяки своїм унікальним розмірам, формі й властивостям, останнім часом усе більш широко застосовуються в науці і техніці. Оскільки вони є майже ідеальні модельні об'єкти для фізичних досліджень, оскільки дають змогу в широких межах змінювати досконалість структури і в такий спосіб моделювати різні умови для перевірки та уточнення існуючих уявлень і отримання нових даних про фізичну природу багатьох процесів, що перебігають у твердих тілах. Дослідження електричних властивостей ниткоподібних кристалів *Si* цікаві як з практичної так і фундаментальної точки зору, завдяки унікальним і привабливим властивостям (високі показники механічної міцності та рухливості носіїв заряду). Тому постає питання про комплексне дослідження електричних характеристик матеріалу з допомогою сучасних підходів, зокрема імпедансної спектроскопії, дають можливість поглибити знання про електропровідність НК, їх поведінку при різноманітних зовнішніх впливах, природу та взаємозв'язки цих ефектів тощо.

У даній роботі наведено результати дослідження імпедансних характеристик ниткоподібних кристалів *Si* з концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик (ПМД), під впливом деформації в інтервалі температур (4,2–30К) для створення елементів з ємнісним імпедансом. Модуль імпедансу і фаза вимірювалися з використанням *Lock In Amplifier 7265 DSP* в діапазоні частот 0,01–250 кГц. Об'єктом дослідження було обрано зразки НК кремнію із р-типом провідності. Легування досліджуваних кремнієвих НК проводилось бором у процесі вирощування методом хімічних транспортних реакцій до концентрацій, що відповідає переходу метал-діелектрик  $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . НК *Si* мали поперечні діаметри 30–50 мкм. Деформація створювалась шляхом закріплення НК на підкладках з відмінним від кремнію коефіцієнтом термічного розширення. Для формування омичних електричних контактів до досліджуваних зразків НК *Si* використовувались дротини *Pt*, які утворюють евтектику з кремнієм при імпульсному зварюванні. Дана методика була апробована в лабораторії і відпрацьована в попередніх дослідженнях

Проведені нами дослідження імпедансу НК *Si* в околі переходу ПМД показали, що для зразків в залежності від концентрації легуючої домішки та температури вимірювання спостерігається імпеданс ємнісного або індуктивного характеру (див., наприклад, рис. 1). Для зразків з

концентрацією домішок, яка відповідає діелектричному боку ПМД, на діаграмі Найквіста за  $T=4,2-10\text{K}$  проявляється від'ємна гілка або ємнісний характер імпедансу (рис. 1), причому зі зменшенням концентрації домішки спостерігається зростання ємнісної складової імпедансу [1]. Як зазначалось в [2–4], ємнісний характер імпедансу зумовлений процесами перезарядки в домішковій підсистемі.

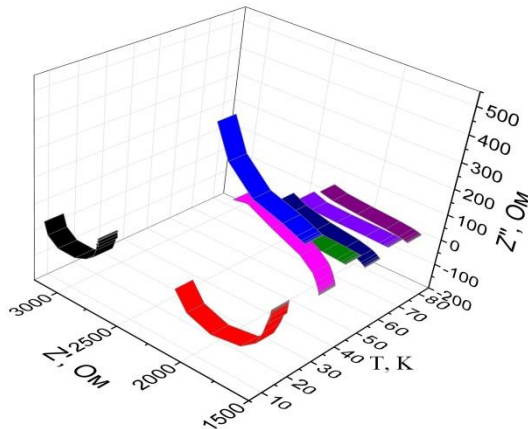


Рисунок 1. Діаграма Найквіста для НК Si ( $\rho_{300\text{K}}=0,0168\text{ Ом}\times\text{см}$ )

зменшенням відстані, на яку відбувається стрибки носіїв заряду. Якщо розглядати носій заряду і домішку, якій він належить, як елементарний плоский конденсатор, то зростання температури сприяє зменшенню відстані між домішками, по яких може переміщатися носій заряду. Як наслідок, відбувається зростання еквівалентної ємності (див. рис. 2).

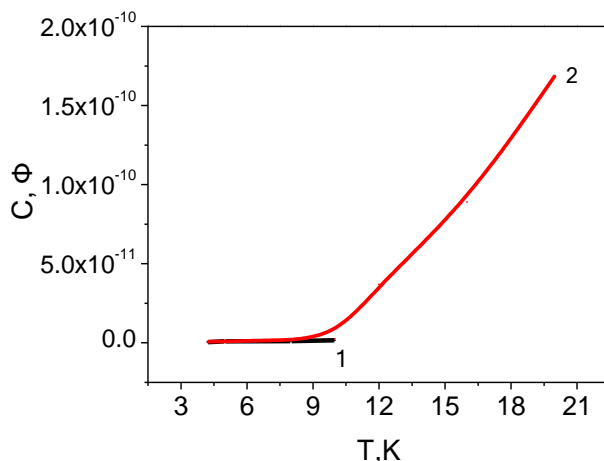


Рисунок 2. Температурна залежність еквівалентної ємності НК Si з  $\rho_{300\text{K}}=0,0168\text{ Ом}\times\text{см}$ : 1 – вільний, 2 – деформований (деформації розтягу  $\varepsilon = -3,8\times 10^{-3}$  від.од.) зразок

$\rho_{300\text{K}}=0,0168\text{ Ом}\times\text{см}$  дозволяє розширити інтервал температур, в якому спостерігається ємнісний імпеданс.

Виявлена особливість НК Si дозволяє спрогнозувати можливість використання кристалів кремнію в якості ємнісних елементів за низьких температур. Із підвищенням температури відбувається зменшення значення реактивної складової опору НК Si. В цьому разі зменшення реактивного опору супроводжується

Отже, регулюючи концентрацію легуючої домішки можна змінювати як температурний інтервал, в якому проявляється ємнісний імпеданс, так і значення відстані між домішками для задання необхідної ємності. Проте дану особливість зміни ємності можна проводити не тільки на етапі виготовлення елементів, але і в процесі експлуатації, задаючи необхідні рівні деформації. Як видно з рис.2, прикладання деформації стиску до НК Si з

Традиційні конденсатори відомих світових виробників (Kemet, Epcos, Murata) характеризуються такими параметрами: як широкий спектр значення ємності від пФ до Ф, високий коефіцієнт добротності, проте мають суттєве обмеження температурного інтервалу від  $-50$  до  $125^{\circ}\text{C}$  і характеризуються досить великими геометричними розмірами  $6,1 \times 1,2$  мм. Напівпровідникові ємнісні елементи на основі НК кремнію є мініатюрні, працюють за температури рідкого гелію і за своїми параметрами можуть успішно застосовуватися у кріоенергетиці.

#### **Перелік посилань**

1. Електропровідність та магнетоопір ниткоподібних кристалів кремнію / А.О. Дружинін, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко, Р.М. Корецький, С.Ю. Яцухненко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": "Електроніка". – 2013. – № 764. – С. 143-149
2. Григорчак І.І. Понеділок Г.В. Імпедансна спектроскопія / І.І. Григорчак – Львів, В-во НУ "Львівська політехніка", 2011. – 352с.
3. Частотная зависимость емкости в структурах на основе пористого кремния / Н.С. Аверкиев, Л.М. Капитонова, А.А. Лебедев, А.Д. Ременюк // ФТТ. –1996. –Т. 30, № 12. –С.2178–2182
4. Pichon L. Experimental validation of the exponential localized states distribution in the variable range hopping mechanism in disordered silicon films / L. Pichon, R. Rogel // Applied Physics Letters. – 2011. – V.99. – P. 072106 – 072106-3.

#### **Анотація**

На основі імпедансних досліджень НК Si з концентрацією легуючої домішки  $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, запропоновано можливість створення напівпровідникових реактивних елементів з ємнісним імпедансом, працездатних за низьких температур  $4,2 - 30\text{K}$ .

Ключові слова: ниткоподібні кристали, імпеданс, ємність.

#### **Аннотация**

На основе импедансных исследований НК Si с концентрацией легирующей примеси  $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует диэлектрической стороне перехода металл-диэлектрик, предложено возможность создания полупроводниковых реактивных элементов с емкостным импедансом, работоспособных при низких температурах  $4,2 - 30\text{K}$ .

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, импеданс, емкость.

#### **Abstract**

The paper deals with studies of impedance spectroscopy of Si whiskers with doping concentration  $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  corresponding to metal-insulator transition in the region of low ( $4,2 - 30 \text{ K}$ ) temperatures. The semiconductor reactive element with capacity impedance has been proposed based on Si whiskers, which can operate in the range of low temperatures.

Keywords: impedance, whiskers, capacitor.