
МІКРОЕЛЕКТРОННА ТА НАНОЕЛЕКТРОННА ТЕХНІКА

УДК 621.315.592

ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si В ОБЛАСТІ ПЕРЕХОДУ МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК

*Дружинін А. О., д.т.н., професор, Островський І. П., д.т.н., доцент,
Ховерко Ю. М. к.т.н, с.н.с., Корецький Р. М.
Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна*

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF SI WHISKERS IN THE RANGE OF METAL-INSULATOR TRANSITION

*Druzhinin A., Doctor of Science (Technics), Professor, Ostrovskii I. Doctor of Science
(Technics), Associate Professor, Khoverko Yu. Candidate of Science (Technics),
Senior Scientific Researcher, Koretskyy R.
Lviv National Polytechnic University, Lviv, Ukraine*

Вступ

На сьогодні низькорозмірні напівпровідникові структури, зокрема ниткоподібні кристали (НК) Si викликають значний інтерес через потенційне застосування в наноелектронних та сенсорних пристроях [1]. Завдяки унікальним і привабливим властивостям (високі показники механічної міцності та рухливості носіїв заряду), НК Si все частіше розглядаються як функціональні композиційні елементи для побудови принципово нових класів пристроїв та схем нано- та мікроелектроніки. Тому постає важливе завдання – моделювання, синтез та дослідження нових функціональних матеріалів на основі НК кремнію. Однак, у зв'язку з можливим впливом особливостей мікроструктури на транспорт носіїв заряду ці матеріали вимагають більш детального розгляду та досліджень з використанням як постійного, так і змінного струму. Тому вивчення частотної зміни електрофізичних властивостей НК з урахуванням їх реальної мікроструктури є важливим і актуальним завданням.

У роботі методом імпедансної спектроскопії досліджені НК кремнію переходу-метал-діелектрик (ПМД) в інтервалі низьких температур 4,2–70 K та частот $(0,01 \div 250) \times 10^3$ Гц. Показано, що застосування методу імпеданс-спектроскопії дозволяє отримати додаткову інформацію про характер провідності в легованих НК кремнію в області ПМД і про можливі процеси перезарядки в системі домішкових центрів.

Результати експерименту

Ниткоподібні кристали були вирошені методом хімічних транспортних реакцій в закритій бромідній системі з використанням домішок бору для

легування та золота як ініціатора росту. Вирощені кристали мали діаметри $(10-40)\times 10^{-6}$ м та довжину $0,3-1\times 10^{-2}$ м. Концентрація легуючих домішок у кристалах змінювалася від 2×10^{24} до 2×10^{25} м⁻³ і відповідала металевому ($5\times 10^{24}\div 2\times 10^{25}$ м⁻³) та діелектричному ($2\times 10^{24}\div 5\times 10^{24}$ м⁻³) боку ПМД, за якого відбувається зміна температурної залежності опору від металевого до напівпровідникового. Контакти до кристалів були створені як методом дугової зварки платинового мікродроту діаметром 15×10^{-6} м, так і спеціальним методом анодування срібла на поверхню кінців НК з подальшим їх встановленням на підкладках з алюмінієвими доріжками. Обидва методи забезпечили омичні контакти до зразків в інтервалі температур 4,2 – 300 К. Опір кристалів вимірювався чотирьохзондовим методом. Похибка вимірювання опору не перевищувала 1%. В ході експериментів було отримано чотири групи зразків з питомим опором $\rho_{300\text{K}}$ $0,94\times 10^{-4}$ Ом·м, $1,42\times 10^{-4}$ Ом·м, $1,55\times 10^{-4}$ Ом·м та $1,68\times 10^{-4}$ Ом·м, відповідно.

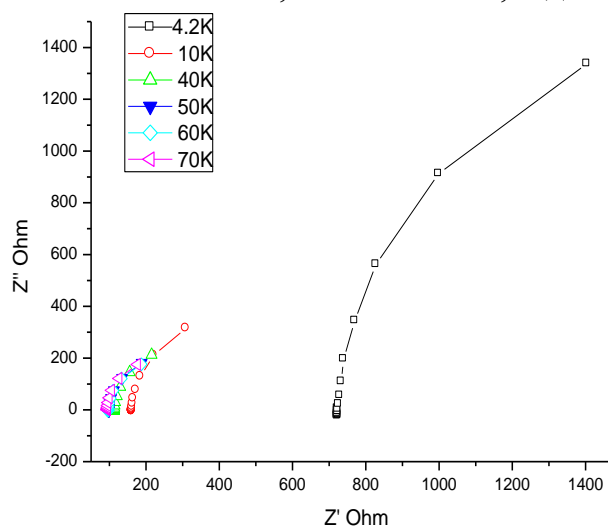


Рис. 1 а) Діаграма Найквіста для НК Si $0,94\times 10^{-4}$ Ом·м

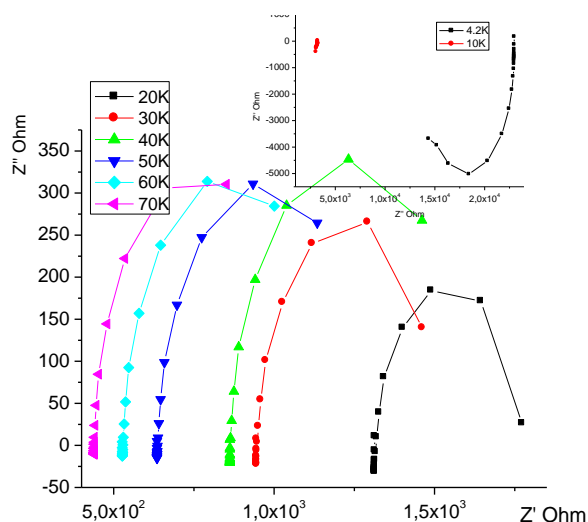


Рис. 2 а) Діаграма Найквіста для НК Si $1,42\times 10^{-4}$ Ом·м

Частотні залежності імпедансу НК кремнію отримані вимірюванням за допомогою приладу Lockin в частотному діапазоні $0,01-250 \times 10^3$ Гц при фіксованих значеннях температури в інтервалі 4,2- 70 К. Для дослідження були відібрані чотири групи зразків з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,94\times 10^{-4}$ - $1,68\times 10^{-4}$ Ом·м). Для кожного типу зразків були отримані діаграми Найквіста та діаграми Бode, які представлені на рис. 1–рис. 4, відповідно.

Як видно з рис. 1 (а) для зразків з концентрацією домішок, що відповідає металевому характеру електропровідності з концентрацією домішки бору більше відносно ПМД, діаграма Найквіста має індуктивний характер опору в усьому вимірюваному діапазоні температур 4,2 – 70 К (так званий характер «від'ємної» ємності [2,3,4]). Слід відмітити, що на діаграмі Найквіста для цих зразків максимальний індуктивний характер опору спостерігається за 4,2 К і з підвищенням температури цей характер зменшується. В

то й же час для зразків з концентрацією домішок, яка відповідає діелектричному характеру провідності відносно ПМД, на діаграмі Найквіста за $T=4,2$ К проявляється від'ємна вітка або ємнісний характер опору (рис. 2,а, рис. 3,а та рис. 4,а), причому зі зменшенням концентрації домішки відбувається зростання ємнісної складової опору.

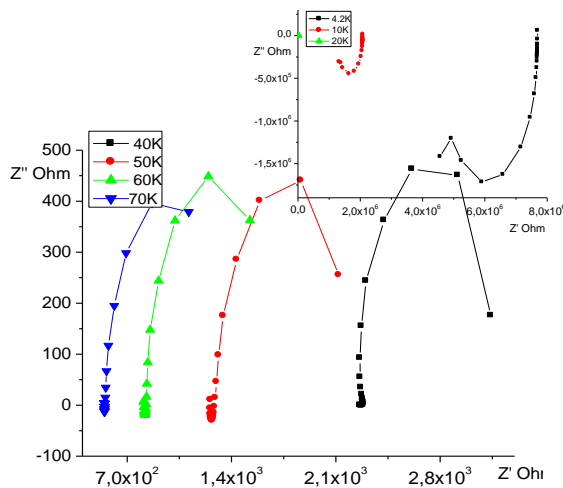


Рис. 3 а) Діаграма Найквіста для НК Si $1,55 \times 10^{-4}$ Ом·м

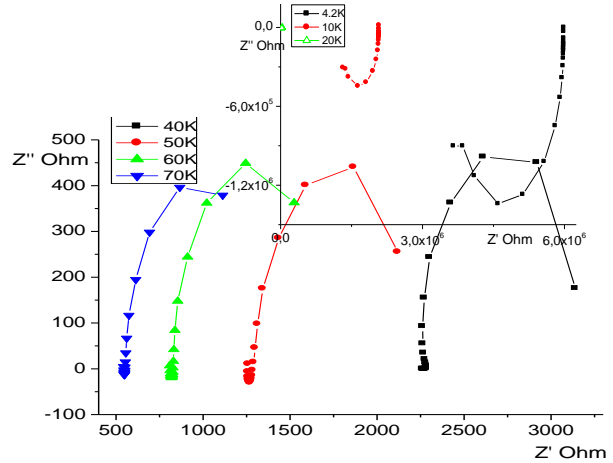


Рис. 4 а) Діаграма Найквіста для НК Si $1,68 \times 10^{-4}$ Ом·м

Оскільки ємнісна складова опору X_c є величиною, оберненою до ємності, зі зменшенням концентрації домішок у зразках відбувається зменшення значення ємності. Крім того, для всіх зразків з діелектричним характером електропровідності при підвищенні температури ($T > 20-30$ К) спостерігається зміна характеру уявної складової опору, тобто ємнісний характер змінюється індуктивним з ємнісним «хвостом» в низькочастотній області, причому зі зменшенням концентрації домішок цей характер посилюється.

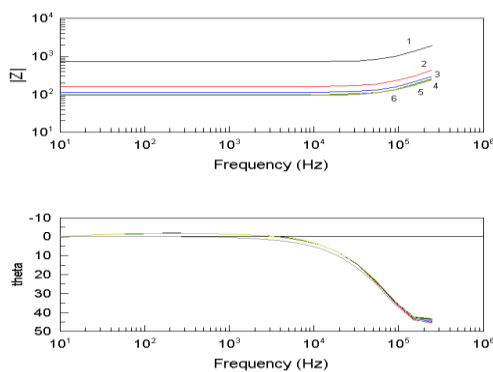


Рис.1 б) Діаграма Бодде для НК Si $0,94 \times 10^{-4}$ Ом·м в температурному діапазоні 1-4,2,2-10,3-40,4-50,5-60,6-70

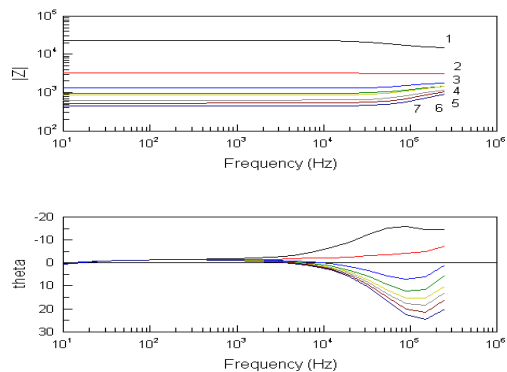


Рис.2 б) Діаграма Бодде для НК Si $1,42 \times 10^{-4}$ Ом·м в температурному діапазоні 1-4,2,2-10,3-20,4-30,5-40,6-50,7-60К

З аналізу діаграм Бодде помітно, що в зразках з металевим характером електропровідності (рис. 1 б) зі збільшенням частоти збільшується опір у

всьому температурному діапазоні, а максимум діелектричних втрат відповідно до графічних залежностей $\text{tg}\delta(\omega)$ припадає на частоти $\sim 100 \times 10^3$ Гц. Для зразків з напівпровідниковим характером електропровідності (рис.2 б) в низькотемпературній області зі збільшення частоти відбувається зменшення опору, а тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta(\omega)$ в частотному діапазоні $10^3 \div 10^6$ Гц стає від'ємним. При цьому в області частот близьких до 100×10^3 Гц за 4,2 К спостерігається резонансний характер зміни тангенса кута діелектричних втрат.

При збільшенні питомого опору зразків розширюється температурний інтервал, в якому проявляється резонанс при низьких температурах (рис.3 б та рис.4 б). З підвищенням температури ($T > 20-30$ К) в зразках з напівп-

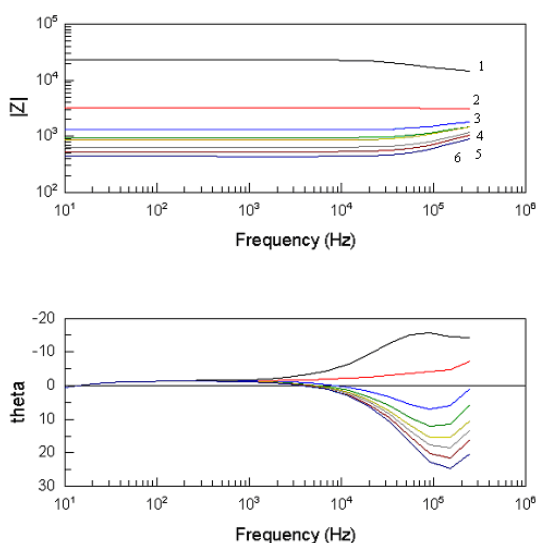


Рис.3 б) Діаграма Бодде для НК Si $1,55 \times 10^{-4}$ Ом·м в температурному діапазоні 1-4,2,2-10,3-20,4-30,5-40,6-50,7-60К

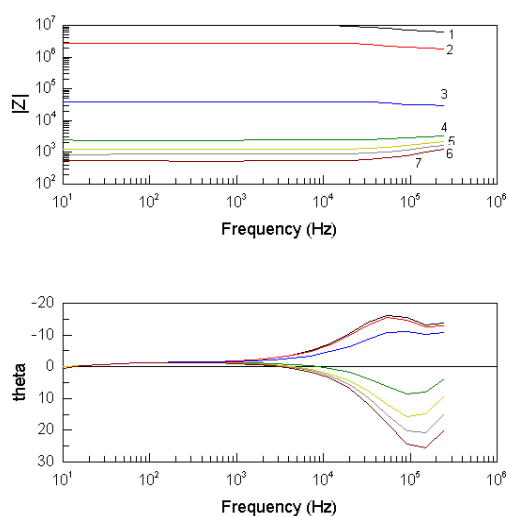


Рис.4 б) Діаграма Бодде для НК Si $1,68 \times 10^{-4}$ Ом·м в температурному діапазоні 1-4,2,2-10,3-20,4-30,5-40,6-50,7-60К

ровідниковим характером електропровідності діаграма Боде змінюється – частотні залежності опору стають подібними на відповідні частотні залежності зразків з металевих характером електропровідності; тангенс кута діелектричних втрат стає позитивним. Відмінністю від зразків з металевих характером електропровідності є чітко виражений резонансний характер зміни тангенса кута діелектричних втрат з температурою, причому частота максимальних діелектричних втрат підвищується з ростом температури.

Обговорення результатів

Аналіз імпедансних досліджень монокристалічних зразків більшості напівпровідникових матеріалів [5] вказує на наявність ємнісного характеру опору на діаграмі Найквіста. Наші дослідження показали, що всі досліджувані зразки незалежно від ступеню легування демонструють індуктивний характер опору на діаграмах Найквіста (за винятком інтервалу низькотем-

пературної $T < 30\text{K}$ провідності для зразків з діелектричним характером електропровідності).

1. Індуктивний характер імпедансу в НК Si

Необхідно відзначити, що ефект «від'ємної ємності» або ж індуктивний імпеданс спостерігався в різноманітних напівпровідникових структурах при доволі різних умовах. Наприклад, при прямих зміщеннях в діодах з бар'єром Шоттки на основі $\text{NiSi}_2\text{-n-Si}$; Pd-n-Si ; Al-n-GaAs [6,7,8]. Ефект «від'ємної ємності» спостерігався у структурах типу кремнієвих $p^+ - n^-$ переходів, опромінених швидкими електронами [9]. Механізм виникнення в настільки різних структурах очевидно різний. Проте він повинен кардинально відрізнятися від механізму у наших зразках — однорідних структурах без бар'єрів.

Пояснення причини виникнення індуктивного характеру імпедансу в зразках слід шукати в особливостях поширення змінного струму в тонкому ниткоподібному кристалі. Як відомо постійний струм розподіляється рівномірно по поперечному перерізі прямолінійного провідника. У змінного струму завдяки індукційній взаємодії різних елементів струму між собою відбувається перерозподіл щільності струму по поперечному перерізу провідника, в результаті чого струм зосереджується переважно в поверхневому шарі провідника. Такий процес перерозподілу змінного струму поблизу поверхні провідника називається скін-ефектом. Ймовірно, такий ефект спостерігається при проходженні змінного струму вздовж НК відносно малого діаметра. Відповідно до цього ефекту відбувається витіснення вільних носіїв заряду на поверхню НК, на якій присутні таммівські стани, які слугують центрами захоплення носіїв заряду, що і спричинює відставання струму відносно напруги. Результат вище описаного процесу і спостерігається на діаграмі Найквіста у вигляді індуктивного характеру імпедансу.

2. Ємнісний характер імпедансу в НК Si

Згідно проведених попередніх вимірювань електропровідності НК Si з концентрацією домішок, що відповідає напівпровідниковому характеру електропровідності [10], в низькотемпературній області спостерігається моттівська стрибкова провідність із змінною довжиною стрибка. В цьому випадку носії локалізовані на домішках і здійснюють стрибки в межах домішкової зони. За умови прикладання постійного струму, чи змінного струму низької частоти $< 10^2$ Гц цей процес має активаційний характер, тобто відбувається з енергією активації $\sim (0,5 \div 5) \times 10^{-19}$ Дж [10] і, відповідно, відбувається з втратами енергії. На діаграмі Бode в області низьких частот спостерігаються незначні діелектричні втрати, а опір зразків з напівпровідниковим характером електропровідності з частотою практично не змінюється (див. рис. 2 б, рис. 3б, рис 4.б)

При підвищенні частоти змінного струму ($> 10^3$ Гц) за рахунок скін-ефекту локалізовані на домішках носії заряду зазнають подвійного впливу:

прямого зміщення полем зовнішнього змінного струму та зворотного зміщення полем струму самоіндукції, в результаті чого може ініціюватися стрибок носія заряду на сусідню домішку. Оскільки генерація носіїв заряду відбувається з домішкового рівня, в зразку з'являються додатні заряджені домішкові центри, що приводить до зростання ємнісного внеску в опір зразка. Аналогічні процеси спостерігалися раніше в гетеропереходах Ge-Si [10]. Змінне електричне поле з частотою $> 10^3$ Гц збуджує процес розрядки цих центрів, в результаті чого в зразку лавиноподібно наростає провідність (опір зразка падає), що супроводжується появою від'ємного значення тангенса кута втрат на діаграмі Боде (див. рис. 2б, 3б, 4б). Зменшення ємнісного вкладу в опір (збільшення значення ємності), яке у зразках з напівпровідниковим характером електропровідності, зумовлено зростанням концентрації локалізованих носіїв заряду внаслідок збільшення концентрації легуючої домішки.

В зразках з напівпровідниковим характером електропровідності при вищих значеннях температури ($T > 20-30$ К) відбувається перехід від ємнісного до індуктивного характеру імпедансу. Цей перехід зумовлений переходом від стрибкового механізму провідності по домішковій зоні до зонної провідності, який відбувається за цих температур. За низьких температур носії заряду локалізовані на домішкових рівнях, провідність відбувається за рахунок стрибків в межах домішкової зони, причому провідність прискорюється прикладанням зовнішнього змінного поля. З підвищенням кінетичної енергії теплового руху носії заряду делокалізуються і стають вільними. При прикладанні змінного поля високої частоти за рахунок впливу скін-ефекту змінюється вигляд діаграм Найквіста та Боде.

У зразках з металевим характером електропровідності відсутня стрибова провідність і як наслідок за рахунок вільних носіїв та дії скін-ефекту за високочастотного поля присутній індуктивний характер імпедансу в усьому досліджуваному температурному інтервалі 4,2 – 70 К.

Слід відзначити та обговорити ще одне виявлене нами явище — резонансний характер частотних залежностей тангенса кута діелектричних втрат. Як видно з рис. 2б, рис. 3б, рис. 4б, резонансний характер (залежність з максимумом $\text{tg}\delta(\omega)$), який припадає на діапазон частот $\sim (70 \div 100) \times 10^3$ Гц) чітко спостерігається для діелектричних зразків, причому виявлене зростання значення частоти резонансу з підвищенням температури від 4,2 до 70 К. Спостереження резонансу як в області стрибкової, так і в області зонної провідності свідчить про однакову причину, однак, діаметрально протилежний вплив певного чинника на провідність кристалів. Так, в області стрибкової провідності спостерігається максимальне від'ємне значення тангенса кута діелектричних втрат, що рівноцінно приросту енергії. Натомість в області зонної провідності спостерігаються максимальні діелектричні втрати.

Відомо [11], що в НК Si спостерігається механічний резонанс. Частота резонансу є близькою до 1×10^6 Гц за кімнатної температури і зменшується при пониженні температури. Ймовірно припустити, що виявлений нами резонансний характер частотних залежностей втрат зумовлений взаємодією з фононами в області механічного резонансу. За умови справедливості цього припущення легко пояснити відмінний характер поведінки тангенса діелектричних втрат. Для порівняно високих температур для вільних електронів фонони відіграють роль центрів розсіювання. Відповідно в області механічного резонансу повинно спостерігатися сильне розсіювання носіїв, що виявлене нами у вигляді максимуму діелектричних втрат. За низьких температур для локалізованих на домішці носіїв заряду стрибок на сусідню домішку, яка знаходиться на досить великій відстані (порядку декілька десятків параметрів ґратки), можливий лише за участю фонона. Тоді в області механічного резонансу ми матимемо лавиноподібне наростання носіїв заряду, які приймають участь в процесах переносу зарядів, за рахунок чого отримується максимальне від'ємне значення тангенса кута діелектричних втрат.

Висновки

Методом імпедансної спектроскопії проведено дослідження імпедансу НК кремнію з концентрацією легуючої домішки поблизу переходу метал-діелектрик в інтервалі низьких температур 4,2 – 70 К та частот $(0,01 \div 250) \times 10^3$ Гц. Отримано такі результати:

1) Показано, що характер уявної складової імпедансу НК кремнію суттєво залежить від ступеня наближення до ПМД. Зокрема, в області низьких температур 4,2 – 20 К у зразках з напівпровідниковим характером електропровідності виявлений ємнісний, а у зразках з металевим характером електропровідності — індуктивний характер діаграми Найквіста.

2) Виявлений індуктивний характер діаграми Найквіста в НК Si пояснюється проявом скін-ефекту при проходженні змінного струму через ниткоподібний кристал, в результаті чого відбувається відставання струму відносно напруги.

3) Ємнісний характер імпедансу в НК Si у діелектричних зразках за низьких температур пояснюється особливостями стрибкової провідності носіїв заряду по домішковій зоні, що супроводжується процесами перезарядки домішкових центрів під час руху носіїв заряду під дією змінного струму високої частоти.

4) Виявлений максимум на частотних залежностях тангенса кута діелектричних втрат у зразках з напівпровідниковим характером електропровідності зумовлений взаємодією з фононами, яка найбільш ефективна в області механічного резонансу, що має місце при частотах $\sim (70 \div 100) \times 10^3$ Гц в інтервалі низьких температур в НК Si.

Література

1. Дружинін А. О Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твердих розчинів у сенсорній електроніці / Островський І. П., Когут Ю. Р. : Монографія. — Львів, НУ «Львівська політехніка», 2010. — 200 с. [\[Publ.\]](#)
2. Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert // *Nano Letters*. — 2006. — Vol. 6, № 4. — P. 640—650. [doi: [10.1021/nl052295q](#)]
3. Bisquert J. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry / J. Bisquert, H. Randriamahazaka, G. Garsia-Belmonte // *Electrochimica Acta*. — 2005. — Vol. 51, № 4 — P. 627—640. [doi: [10.1016/j.electacta.2005.05.025](#)]
4. Mora-Sero I. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / I. Mora-Sero, J. Bisquert, F. Fabregat-Santiago, G. Garcia Belmonte // *Nano Letters*. — 2006. — Vol. 6, № 4. — P. 640—650. [doi: [10.1021/nl052295q](#)]
5. Аверкиев Н. С. Частотная зависимость емкости в структурах на основе пористого кремния / Н. С. Аверкиев, Л. М. Капитонова, А. А. Лебедев, А. Д. Ременюк // *Физика и техника полупроводников*. — 1996. — Т. 30, № 12. — С. 2178—2182. [\[Publ.\]](#)
6. Werner J. Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts / A. Levi, R. T. Tung // *Physical review letters*. — 1988. — Vol. 60. — P.53—56. [doi: [10.1103/PhysRevLett.60.53](#)]
7. Wu X. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces / X. Wu, E. S. Yang, H. L. Evans // *Journal of Applied Physics*. — 1990. — Vol. 68. — P. 2845—2848. [doi: [10.1063/1.346442](#)]
8. Steiner K. Inductive reactances and excess capacitances at $W_{n/n}$ -GaAs Schottky gate contacts / K. Steiner, N. Uchitami, N. Toyoda // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. — 1990. — Vol. 8, № 5. — P. 1113—1116. [doi: [10.1116/1.584926](#)]
9. Поклонский Н. А. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p^+-n^- переходов, облученных быстрыми электронами / Н. А. Поклонский, С. В. Шпаковский, Н. И. Горбачу, С. Б. Ластовский // *Физика и техника полупроводников*. — 2006. — Т. 40, № 7. — С. 824—828. [doi: [10.1134/S1063782606070128](#)]
10. Дружинін А. О. 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*. — 2012. — № 734. — С. 91—97. [\[Publ.\]](#)
11. Ермаков А. П. Механические свойства нитевидных кристаллов кремния и германия при внешних воздействиях и методы их изучения : дис. на соискание наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.04.07 «Физика твердого тела» / А. П. Ермаков ; Воронежский государственный технический университет. — Воронеж, 2000.

References

1. Druzhynin A. O., Ostrovskiy I. P., Kogut Yu. R. (2010) *Nytkopodibni krystaly kremniuu, germaniiu ta yikh tverdykh rozchyniv u sensornii elektronitsi* [Whiskers of silicon, germanium and their solid solutions in sensors electronic]. Lviv, Lvivska politekhnika Publ., 200 p. [\[Publ.\]](#)
2. Mora-Sero I., Bisquert J. (2006) Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells. *Nano Letters*, Vol. 6., No 4, pp. 640–650. doi: [10.1021/nl052295q](#)

3. Bisquert J., Randriamahazaka H., Garsia-Belmonte G. (2005) Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry. *Electrochimica Acta*, Vol. 51, No 4, pp. 627–640. doi: [10.1016/j.electacta.2005.05.025](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.05.025)
4. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F., Garcia Belmonte G. (2006) Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells. *Nano Letters*, Vol. 6, No. 4. pp. 640-650. doi: [10.1021/nl052295q](https://doi.org/10.1021/nl052295q)
5. Averkiev N. S., Kapitonova L. M., Lebedev A. A., Remeniak A. D. (1996) Chastotnaia zavisimost yemkosti v strukturakh na osnove porystogo kremniia. *Physics and Technics of Semiconductors*. Vol. 30, No 12, pp. 2178-2182.
6. Werner J., Levi A. F. J., Tung R. T., Anzlowar M., Pinto M. (1988). Origin of the excess capacitance at intimate Schottky contacts. *Physical review letters*. Vol. 60, pp. 53-56. doi: [10.1103/PhysRevLett.60.53](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.53)
7. Wu X., Yang E. S., Evans H. L. (1990) Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces. *Journal of Applied Physics*, Vol. 68, pp. 2845-2848. doi: [10.1063/1.346442](https://doi.org/10.1063/1.346442)
8. Steiner K., Uchitami N., Toyoda N. (1990) Inductive reactances and excess capacitances at W_{N_x}/n -GaAs Schottky gate contacts. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 1113–1116. doi: [10.1116/1.584926](https://doi.org/10.1116/1.584926)
9. Poklonski N. A., Shpakovski S. V., Gorbachuk N. I., Lastovskii S. B. (2006) Negative capacitance (impedance of the inductive type) of silicon p+–n junctions irradiated with fast electrons. *Semiconductors*. Vol. 40, No 7, pp. 803-807. doi: [10.1134/S1063782606070128](https://doi.org/10.1134/S1063782606070128)
10. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Koretsky R. M., Yatsukhnenko S. Yu. (2012) Elektroprovodnist ta magnetoopir nytkopodibnyh krystaliv kremniiu. *Visnyk of Lviv Polytechnic National University, Electronics*, no. 734, pp. 91-97. [\[Publ.\]](#)
11. Ermakov A. P. *Mehanicheskie svoystva nitevidnyh krystallov kremniia i germaniia pry vneshnyh vozdeystviyah i metody ih izucheniya*. Dis. kand. tehn. nauk. [Mechanical properties of whiskers of silicon and germanium caused by external influences and methods of their study. Cand. tech. sci. diss.]. Voronezh, 2000.

Дружинин А. О., Островський І. П., Ховерко Ю. М., Корецький Р. М. Імпедансна спектроскопія ниткоподібних кристалів Si в області переходу метал-діелектрик
На основі дослідження електропровідності ниткоподібних кристалів Si<B, Au> з діаметрами 40×10^{-6} м, легованих домішкою бору до концентрацій поблизу переходу метал-діелектрик ($\rho_{300K} = 0,94 \div 1,68 \times 10^{-4}$ Ом·м) у температурному інтервалі $4,2 \div 70$ К, частотному діапазоні $0,01 \div 250 \times 10^3$ Гц виявлено, що імпеданс зразків в залежності від температури має ємнісний ($4,2K - 20 K$) та індуктивний ($30 - 70 K$) характер, величина якого залежить від концентрації легуючої домішки. На основі досліджень кристалів методом імпедансної спектроскопії обговорено відмінність поведінки імпедансу зразків з різною концентрацією легуючої домішки.

Ключові слова: кремній, ниткоподібні кристали, перехід метал-діелектрик, імпеданс-спектроскопія.

Дружинин А. А., Островский И. П., Ховерко Ю. Н., Корецкий Р. Н. Импедансная спектроскопия нитевидных кристаллов Si в области перехода металл-диэлектрик
В результате выполненных исследований электропроводности нитевидных кристаллов Si <B, Au> с диаметрами 40×10^{-6} м, легированных примесью бора до концентраций вблизи перехода металл-изолятор ($\rho_{300K} = 0,94 \div 1,68 \times 10^{-4}$ Ом м) в температур-

ном інтервалі $4,2 \div 70$ К, частотному діапазоні $0,01 \div 250 \times 10^3$ Гц обнаружено, что импеданс образцов в зависимости от температуры имеет емкостный ($4,2 - 20$ К) и индуктивный ($30-70$ К) характер, величина которого зависит от концентрации легирующей примеси. Исходя из результатов исследований кристаллов методом импедансной спектроскопии обсуждены отличия поведения импеданса образцов с различной концентрацией легирующей примеси.

Ключевые слова: кремний, нитевидные кристаллы, переход металл-диэлектрик, импеданс спектроскопия.

Druzinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Koretsky R. Impedance spectroscopy of Si whiskers in the range of metal-insulator transition

Introduction. The paper deals with investigation of impedance spectroscopy of Si whiskers with doping concentration in the vicinity to metal-insulator transition in the region of low ($4,2 - 70$ К) temperature and frequency range $0,01 - 250 \times 10^3$ Hz.

Experimental results. The silicon whiskers were grown by chemical vapour deposition method in closed bromine system. The whiskers of 40×10^{-6} m in diameter have boron concentration from 2×10^{18} to 2×10^{19} cm⁻³. The impedance spectroscopy of Si whiskers was investigated with use of Lock-in amplifier in the region of low ($4,2 - 70$ К) temperature and frequency range $0,01 - 250 \times 10^3$ Hz. The investigations showed that in the range of zone conductance ($T = 30 - 70$ К) the whisker impedance has inductive character, while at the range of impurity conductance ($T = 4,2 - 20$ К) impedance changes to capacity character. The reduction of impurity concentration at dielectric side of metal-insulator transition leads to decrease of the whisker capacity in the range of low temperatures.

Discussion. An inductive character of whisker impedance is explained skin-effect of conductance in thin whisker, while capacity character of the whisker impedance is connected with hopping conductance on impurity band.

Conclusions. Character of changes of Si whisker impedance conductance is discussed in the frame of hopping conductance on impurity band, which takes place at low temperatures.

Keywords: silicon, whiskers, metal-insulator transitions, impedance spectroscopy.