ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ НАКОПИЧЕННЯ, ЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ: ТЕОРІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ

к.т.н. Балабан О.В., к.т.н. Матулка Д.В.

2021

МЕТА РОБОТИ:

З'ясування закономірностей зміни властивостей енергонакопичувальних частинок та наноструктур під дією зовнішніх фізичних полів в залежності від їх електронної будови, структурної організації, морфології експериментальними методами та теоретичними розрахунками, на основі квантово-механічних підходів та моделей.

Розроблення наукових основ накопичення і зберігання електричної енергії на квантовому рівні за основної участі електронів і їхніх спінів. Дослідження кінетики та термодинаміки процесу інтеркаляційного струмотворення; енерго-ємності пористого вугілля з природної сировини. Розробка шляхів досягнення високих значень добротності шаруватих структур та файберів; встановлення змін поляризаційних характеристик планарних структур у постійному зовнішньому магнітному полі.

Аналіз особливостей взаємодії подвійних електричних шарів в наноструктурах; дослідження електрон-електронної взаємодії у нанооб'єктах та впливу зовнішнього магнітного поля на енергетичний спектр таких об'єктів.

НАУКОВА НОВИЗНА:

- Вперше досліджено особливості електрон-електронної взаємодії і показано їх вплив на фізичні властивості нанооб’єкту.
- Вперше встановлено, що після ультразвукового опромінення нанопористого вугілля з різних видів природної сировини, питома ємність матеріалу немонотонним чином залежить від розміру частинок, а КОН модифікація, на відміну від ультразвукової обробки, значно підвищує значення питомої ємності комерційного матеріалу Norit Supra, порівняно з некомерційним вугіллям із хвоща польового, очевидно, за рахунок наперед зазначеної морфології вихідного матеріалу, малого розкиду частинок за розмірами.
- Вперше проаналізовано вплив інтеркальованого атома на енергетичний спектр шаруватого кристалу в рамках моделі Кроніга-Пенні. Вплив проаналізовано в залежності від потенціалу впровадженого атома, а також від його геометричних розмірів.
- Вперше встановлено, що ультразвукове опромінення природних мінералів є ефективним методом модифікування домішкової енергетичної топології. Виявлено ефект аномального зростання (~10^{-5} см^2/с) коефіцієнта дифузії літію у інтеркалаті пірофіліту при низьких значеннях гостьового навантаження x з інтервалу ($0 < x < 0,3$), спричиненого дією ультразвукового опромінення за рахунок викликаної ним зміни домішкової енергетичної топології та взаємодії гість – господар.

НАУКОВА НОВИЗНА:

- Вперше встановлено основні електричні властивості нанофайберів, а також структур НВМ/γ-Fe_2O_3 за кімнатних температур та у постійному магнітному полі.
- Вперше виявлено, що накладання магнітного поля під час вимірювань перпендикулярно до площини НВМ/γ- Fe_2O_3 призводить до росту діелектричної проникності ε матеріалу і значення магнітоємнісного ефекту сягає 4000% в інфранизькочастотному діапазоні за кімнатної температури.
- Вперше виявлено, що накладання магнітного поля під час вимірювань вздовж площини НВМ/γ- Fe_2O_3 призводить до аномальної дисперсії діелектричної проникності – її росту при збільшенні частоти, що пов’язано з додатковою поляризацією, яка виникає при перескоковому перенесенні заряду по локалізованих станах поблизу рівня Фермі.
- Вперше в рамках теорії збурення проаналізовано енергетичний спектр нанооб’єктів в залежності від величини зовнішнього магнітного поля і його напрямку. Показано, що енергетичний спектр нанооб’єктів залежить від розмірів досліджуваного об’єкта і від напряму прикладеного зовнішнього магнітного поля.
- Вперше, теоретично проаналізовано вплив зовнішнього магнітного поля на квантову ємність низько-розмірних об’єктів різної енергетичної топології.
- Проведено теоретичні дослідження і проаналізовано їхню кореляцію із результатами експериментів.

ПОРИСТІ ВУГІЛЬНІ МАТЕРІАЛИ КОНДЕНСАТОРІВ З ПОДВІЙНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ШАРОМ

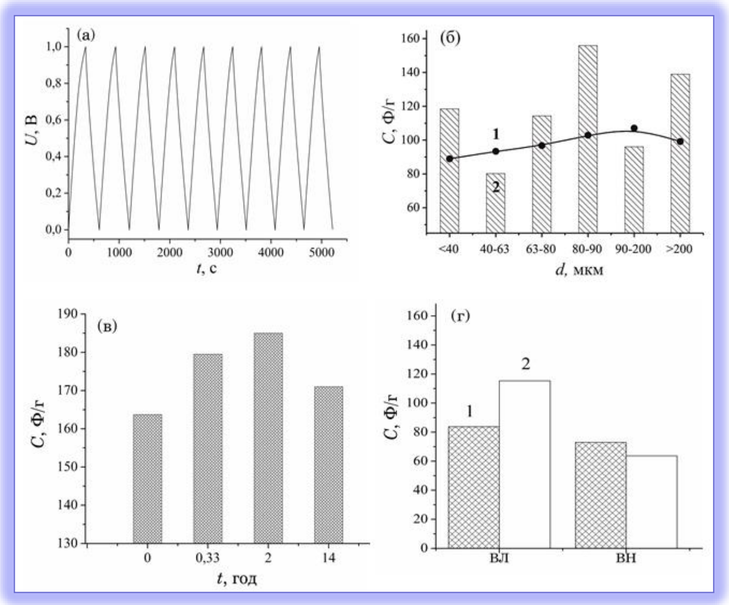


Рис. 1. Гальваностатичні цикли „заряд-розряд”(а), питомі ємності межі розділу 30% КОН з вихідними (1) та обробленими УЗ (2) ВД (б), ВК (в), ВН і ВЛ (г)

Досліджено вугільні матеріали, а також запропоновано ефективні методи їх модифікування для отримання високих енерго-ємнісних характеристик накопичувачів енергії – конденсаторів з ПЕШ. Такими матеріалами, з огляду на вартість та екологічність, є вугілля, отримане з деревини (ВД), фруктових кісточок (ВК), лляних волокон (ВЛ), хвоща польового, а також комерційне – NanoCarbon (ВН) та Norit Supra. Для збільшення їх ємнісних характеристик використано різні модифікування, наприклад, ультразвукове (УЗ), КОН, полімеризація. Імпедансний аналіз і результати циклічної вольт-амперометрії підтвердили ємнісне накопичення енергії у всіх досліджених у циклі робіт вугільних матеріалах

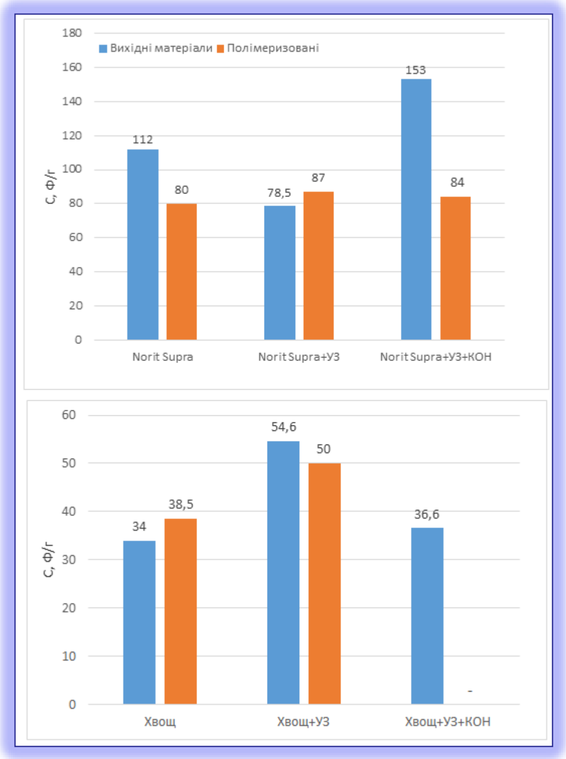


Рис. 2. Питомі ємності межі розділу 30% КОН з вугіллям, на основі Norit Supra та хвоща польового

На відміну від неопромінених матеріалів, ультразвукова обробка призводить до немонотонної залежності (як зменшення, так і збільшення) питомої ємності від розміру частинок. Так, після ультразвукової обробки, тривалістю 20 хв, питома ємність вугілля деревного почала немонотонним чином залежати від розміру частинок (158 Ф/г (фракція 80 – 90 мкм), 79 Ф/г (фракція 40 – 63 мкм)), в той час як для вихідного матеріалу ємність була ~ 95 Ф/г. Для вугілля лляного і кісточкового ріст ємності після такої обробки складає 38 і 13 %, відповідно. Питома ємність вугілля з хвоща польового зростає майже вдвічі після УЗ обробки. Подальша КОН модифікація призводить до максимального росту ємності 153 Ф/г матеріалу Norit Supra.

ПОРИСТІ ВУГІЛЬНІ МАТЕРІАЛИ КОНДЕНСАТОРІВ З ПОДВІЙНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ШАРОМ

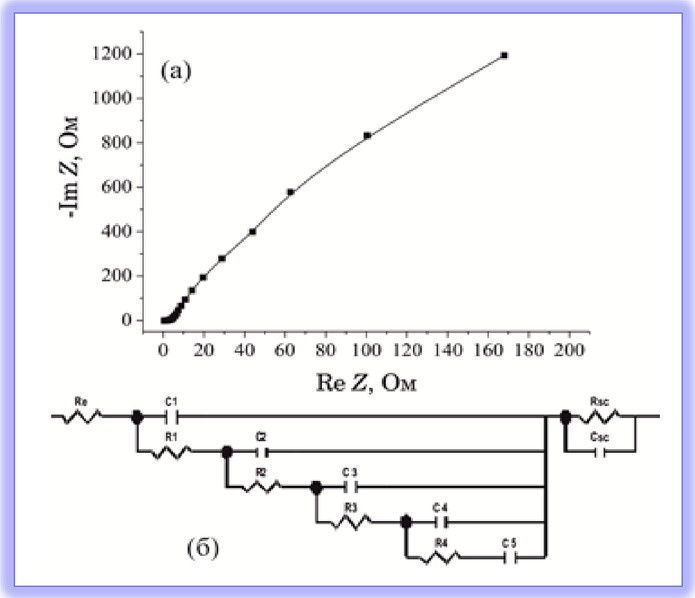


Рис. 3. Типова діаграма Найквіста (а) та відповідна до неї електрична схема (б)

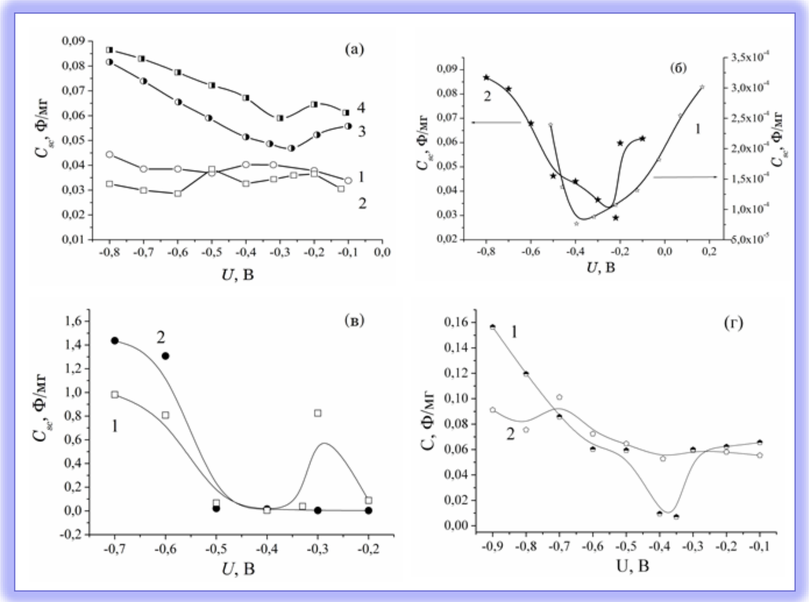


Рис. 4. Вольт-фарадні залежності для: ВД фракцій 40-63мкм (1,3) та 80-90(2,4) до (1,2) та після (3,4) УЗ обробки (а);для ВЛ (б), ВН (в) та ВК (г) до (1) та після(2) УЗ обробки

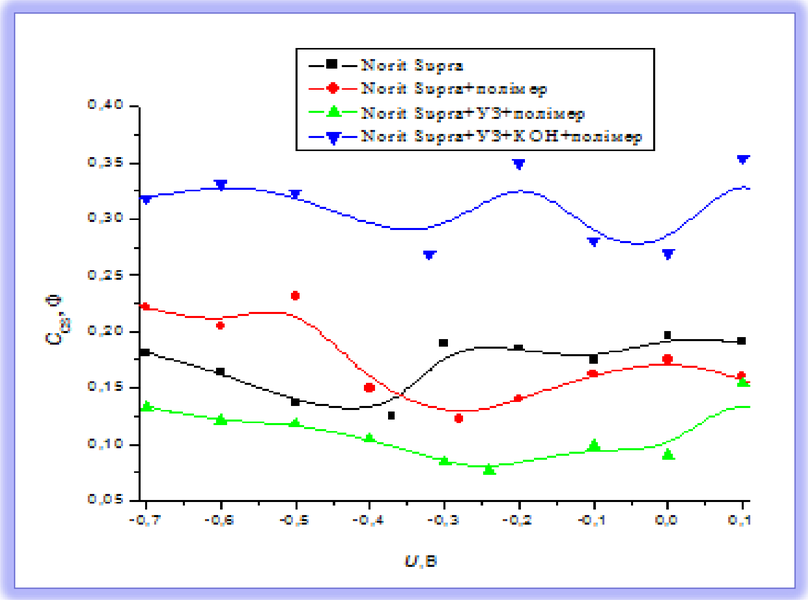


Рис. 5. Вольт-фарадні залежності ємності області просторового заряду досліджуваних матеріалів з Norit Supra

Зростання питомої ємності вугільних матеріалів після ультразвукового опромінення відбувається, в основному, за рахунок його впливу на дефектну та електронну будову матеріалів (максимальне зміщення положення рівня Фермі становить 0,3 еВ), а також за рахунок зміни розподілу пор за розмірами (від 4,6 нм до 1,9 нм у вугіллі з фруктових кісточок).

КОН модифікація, на відміну від ультразвукової обробки, значно підвищує значення питомої ємності Norit Supra, а у випадку хвоща польового не змінює відповідної величини. Комбінуючи полімеризацію з ультразвуковою обробкою та КОН модифікацією, можна одержати значення питомої ємності до 87 Ф/г та 50 Ф/г у вугіллі Norit Supra та вугіллі на основі хвоща польового, відповідно.

СТРУКТУРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПОРИСТИХ ВУГІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Таблиця 1. Зміна площі активної поверхні ВК після УЗ опромінення, обчислена різними методами

Методи \ Матеріали	S, $м^2/г$			
	Вихідний	20-хв УЗ	2-год УЗ	14-год УЗ
SAXS	1296	1384	-	-
BET	1475	1570	1529	1398
DFT	1426	1502	1475	1350

Дані скануючої електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу матеріалів на основі хвоща польового показали значний розкид частинок за розмірами, а також значну кількість домішок (Si, Cl, K), в той час як для матеріалів з комерційного вугілля Norit Supra спостерігалася однорідність матеріалів за розмірами і переважна більшість домішок SiO_2. Така кардинальна різниця пояснюється тим, що Norit Supra, як комерційний матеріал, має наперед визначені структурні особливості та відповідний хімічний склад, на відміну від вугілля, синтезованого з хвоща польового.

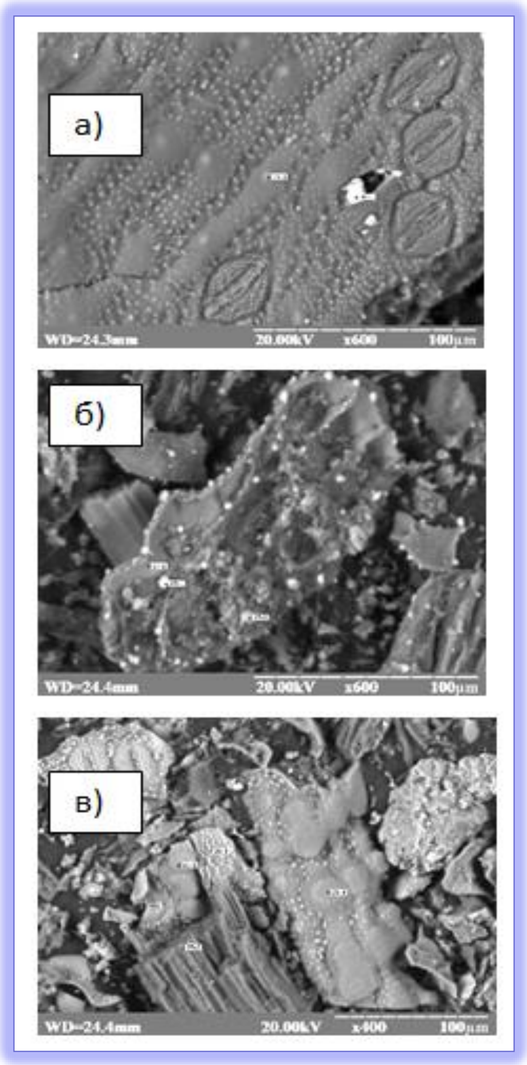


Рис. 6. СЕМ зображення матеріалу на основі вихідного (а, б), а також покритого полімером (в) хвоща польового

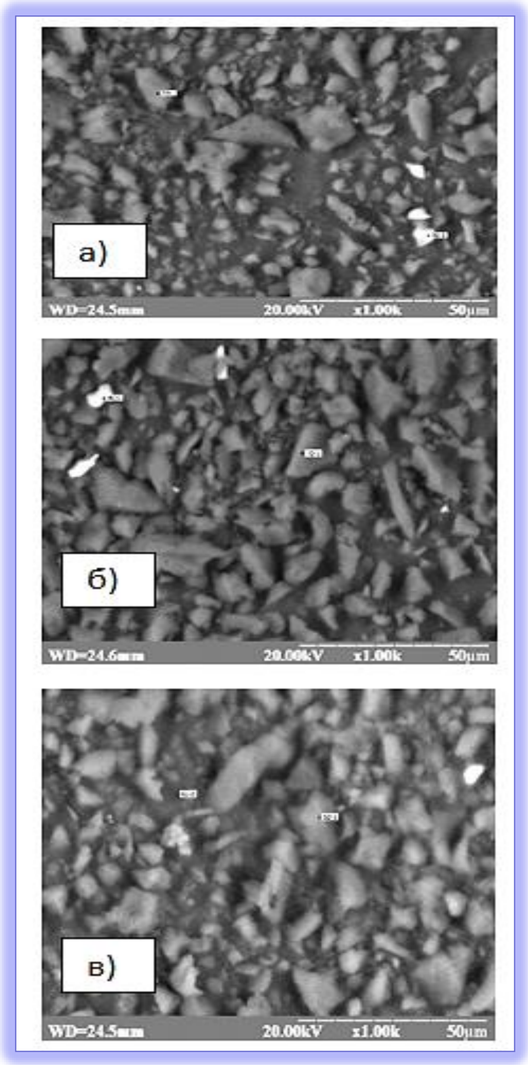


Рис. 7. СЕМ зображення: а) Norit Supra вихідний, б) Norit Supra полімеризований, в) Norit Supra+УЗ+КОН+полімеризація

КВАНТОВО-МЕХАНІЧНІ ЕФЕКТИ У ПОДВІЙНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ШАРІ

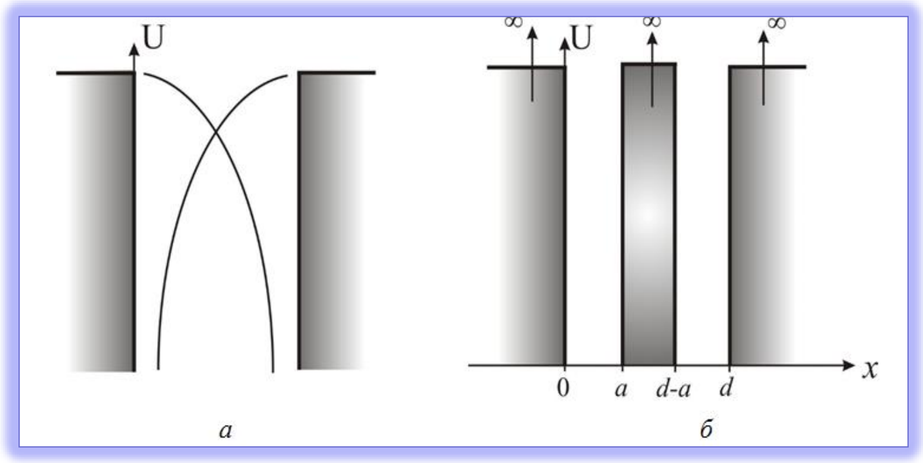


Рис. 8. Реальний (а) і модельний (б) одномірний потенціал пори із подвійними електричними шарами

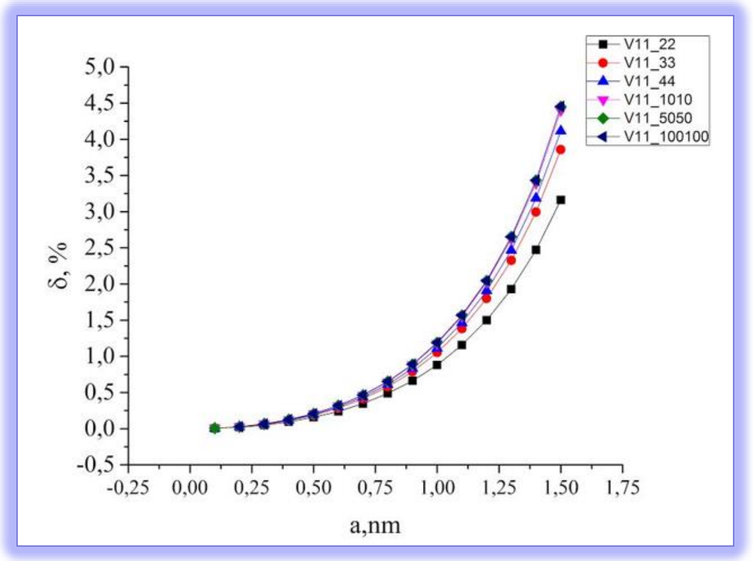


Рис. 9. Залежність відносного відхилення від V_{11} потенціальних енергій V_{nm} взаємодії електронів з протилежних ям, що перебувають в станах n і m (симетричний випадок) від ширин ям a

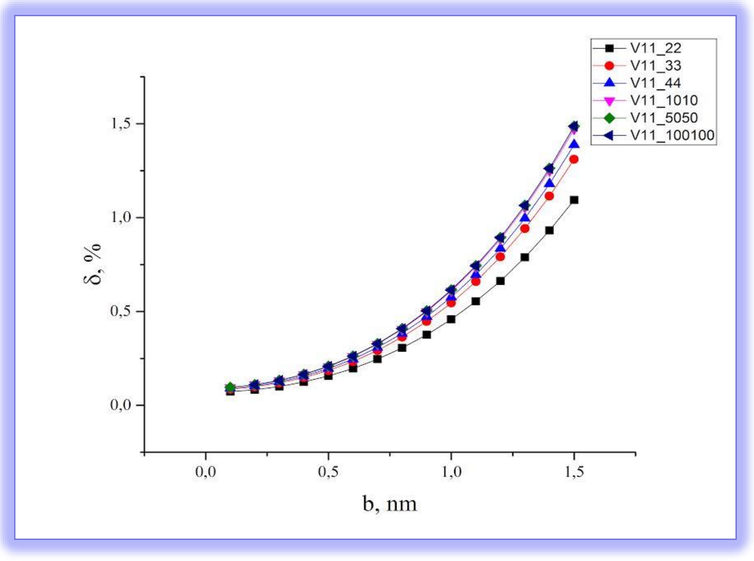


Рис. 10. Залежність відносного відхилення від V_{11} потенціальних енергій V_{nm} взаємодії електронів з протилежних ям, що перебувають в станах n і m від ширини ями (асиметричний випадок – ширина протилежної ями фіксована 0.1 нм)

Теоретично досліджено взаємодію між електронами в протилежних подвійних шарах у наноструктурах із урахуванням дискретності їх станів. Показано, що за певного співвідношення між шириною подвійних шарів і відстанню між ними взаємодія між електронами чутлива до їх енергетичних станів.

Чутливість взаємодії електронів до їх енергетичних станів може мати певний прояв у електрофізичних характеристиках. Описана взаємодія впливає на ступінь локалізації подвійного електричного шару, який визначає ємність матеріалу.

ЕЛЕКТРОН-ЕЛЕКТРОННА ВЗАЄМОДІЯ У КВАНТОВО-РОЗМІРНИХ ОБ’ЄКТАХ

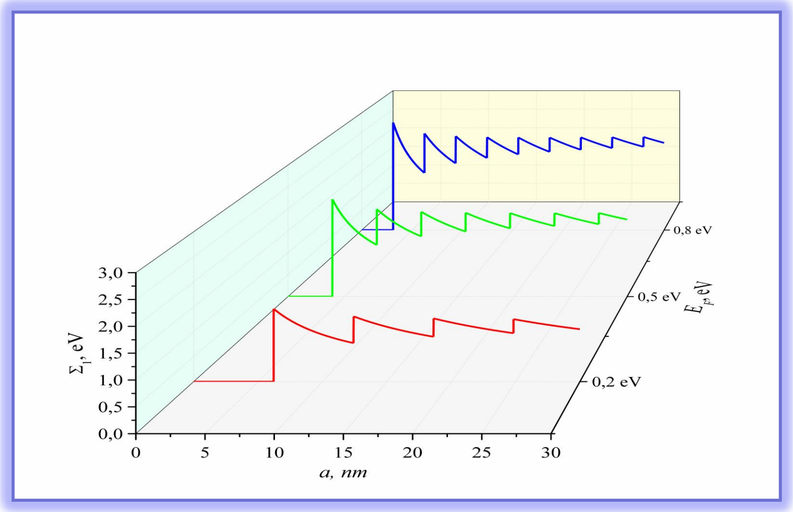


Рис. 11. Залежність енергії основного квантового стану від ширини ями a при фіксованому положенні рівня Фермі E_F (0.2, 0.5, 0.8 еВ)

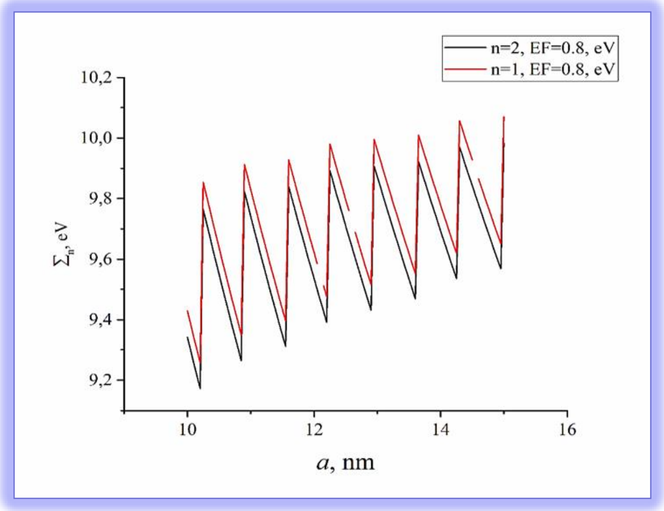


Рис. 12. Залежність кулонівської енергії від ширини ями a при фіксованому положенні рівня Фермі (E_F = 0,8 еВ) для основного і першого збудженого квантового станів

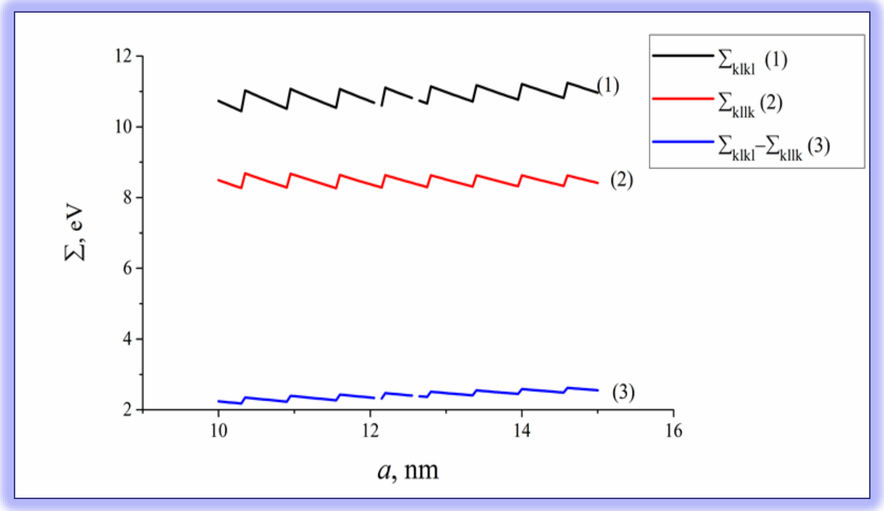


Рис. 13. Залежність кулонівської, обмінної та енергії Хартрі-Фока основного стану від ширини ями при фіксованому положенні рівня Фермі (1.0 eV)

Отримано перенормування електронного спектру в нанооб'єктах при T = 0 К в наближенні Хартрі-Фока. Аналіз власної енергії основного та першого збудженого станів, обумовлених електрон-електронною взаємодією, в залежності від ширини нанооб'єкта при фіксованому положенні рівня Фермі, виявляє його пилоподібну природу зі стрибками до 6%. Амплітуда стрибків зменшується із зростанням ширини ями, а діапазон ширини, в якій спостерігаються стрибки для основного стану, більший, ніж для збуджених. Єдиною причиною такої поведінки, а також аналізованої поправки в залежності від положення рівня Фермі при фіксованій ширині нанооб'єкта, є розмірне квантування.

ШАРУВАТІ КРИСТАЛІЧНІ СТРУКТУРИ ДЛЯ Li^+-ІНТЕРКАЛЯЦІЙНОГО СТРУМОТВОРЕННЯ

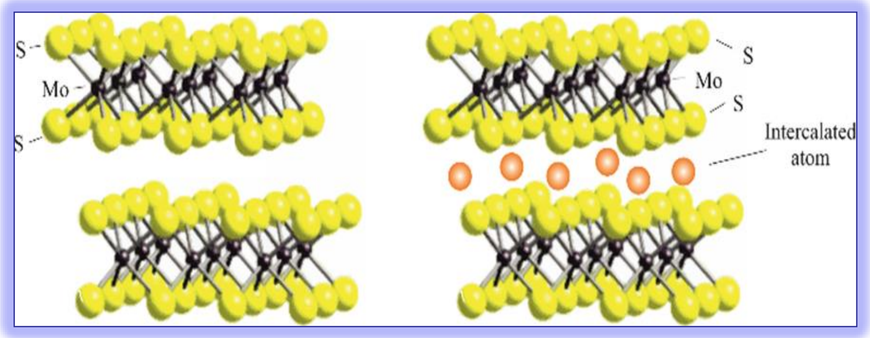


Рис. 14. Приклад шаруватого кристалу типу MoS_2 до інтеркаляції (а) та після інтеркаляції (б)

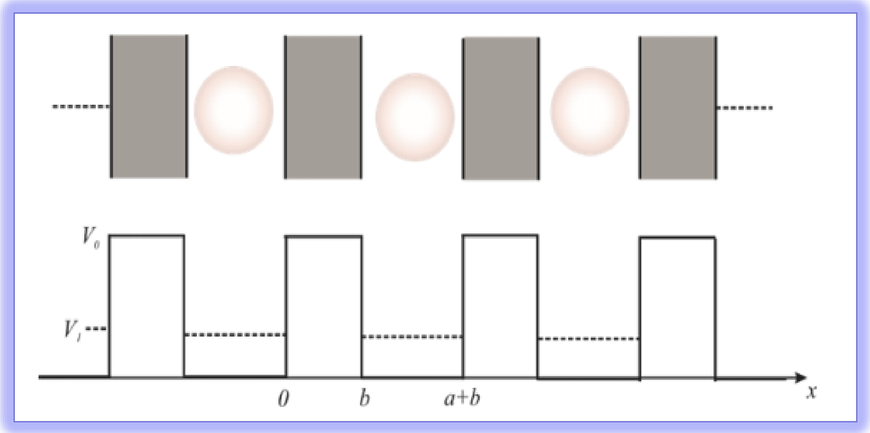


Рис. 15. Пакети з інтеркальованими атомами (вгорі) та потенціалом системи (внизу)

Розглянули явище інтеркаляції, як одночасний прояв геометричної зміни шаруватого кристалу (MoS_2, тальку, пірофіліту) і зміни потенціалу ван-дер-ваальсової щілини, спричинених інтеркалатом. Обидва фактори залежать від особливостей інтеркалата – його розмірів, зарядового стану, взаємодії з кристалічною матрицею. Отримані результати встановили монотонно спадний характер ширин заборонених зон з ростом потенціалу V_1 ван-дер-ваальсової щілини при довільних значеннях її товщини.

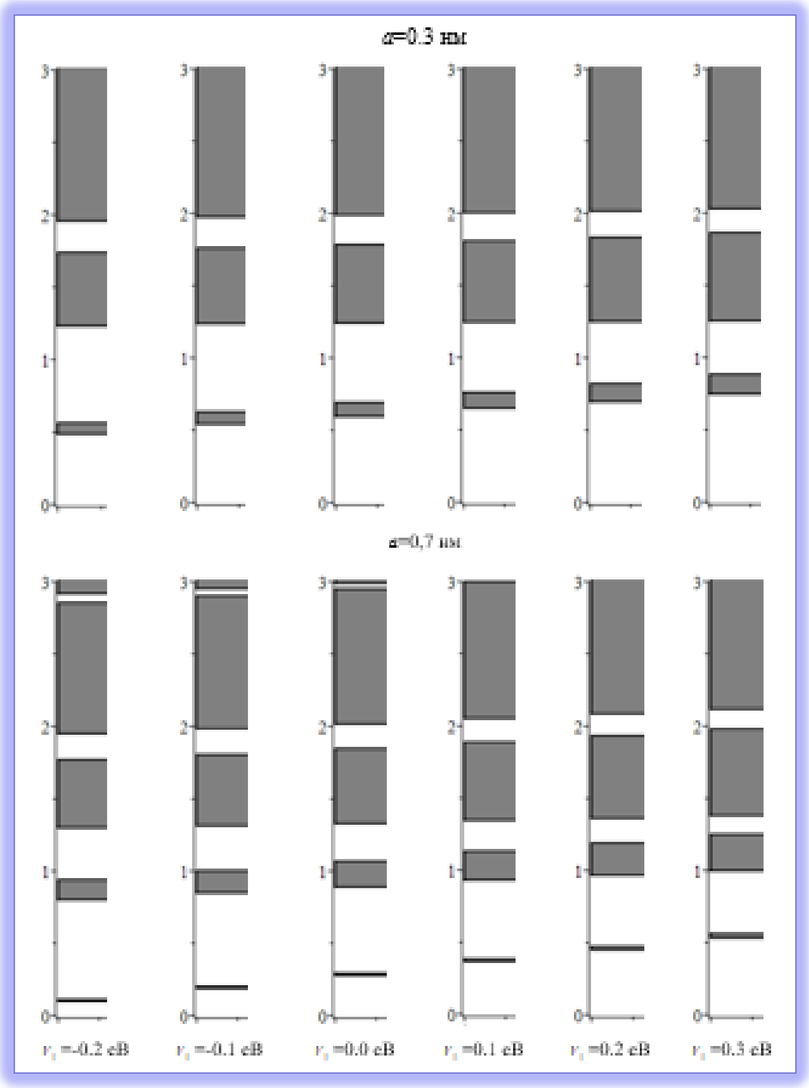


Рис 16. Залежності електронних станів від потенціалу V1 ями для моделі Кроніга-Пенні з шириною пакета b=0,8 нм і значенням його потенціалу еВ для випадку ширини ями 0,3 нм та 0,7 нм. Темні області – ширини дозволених значень енергії

ДОСЛІДЖЕННЯ КАТОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПРИРОДНИХ МІНЕРАЛІВ

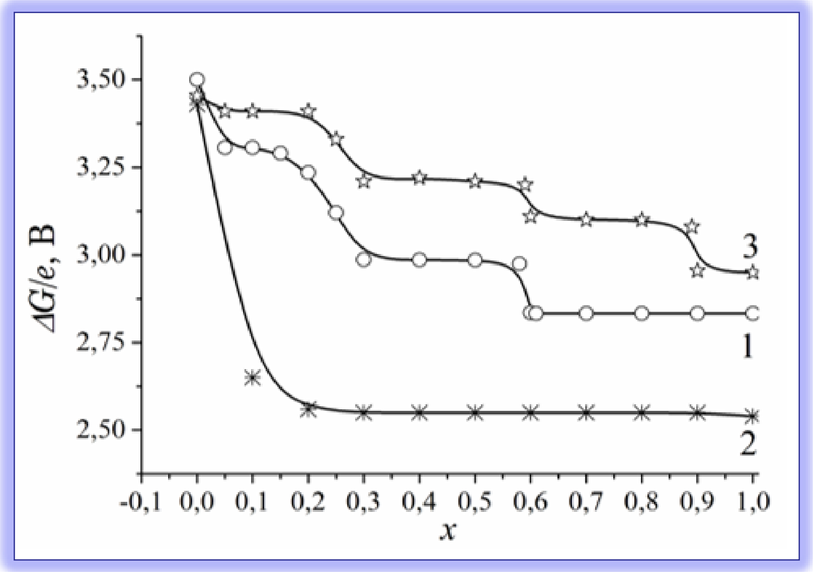


Рис. 17. Зміна енергії Ґіббса процесу літієвої інтеркаляції в пірофіліт до (1) і після його УЗ обробки в 1 М $LiBF_4$ у γ-бутиролактоні (2) і гептані (3)

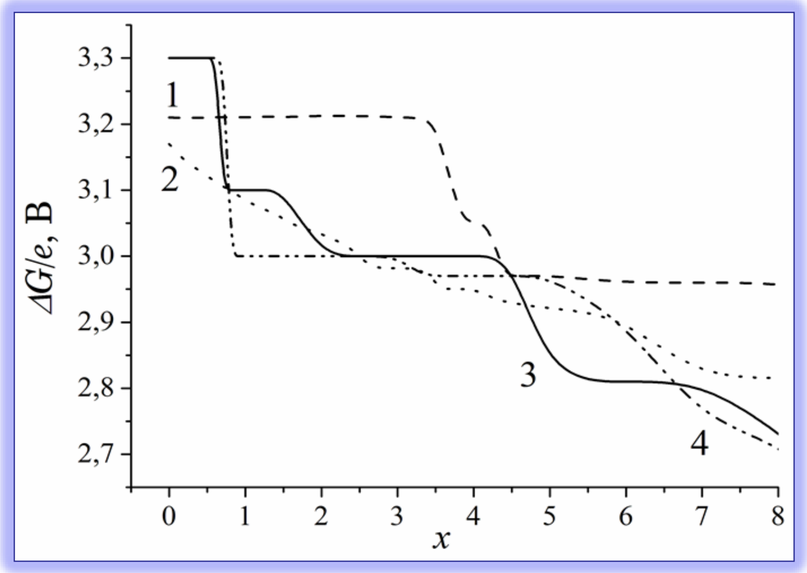


Рис.18. Зміна енергії Ґіббса процесу літієвої інтеркаляції в тальк 1 мкм (1,3) та 0,5 мкм фракцій (2,4) відповідно до (1,2) і після (3,4) УЗ обробки

УЗ обробка пірофіліту розширює область (x> 0,3) аномальних значень коефіцієнта дифузії (~10^{-5} $см^2/с$) на всю досліджену концентраційну вісь x. При малих значеннях гостьового навантаження x коефіцієнт дифузії літію в тальку зростає на порядок після УЗ обробки.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХІДНИХ ТА ПОЛІМЕРИЗОВАНИХ КАТОДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ MoS_2

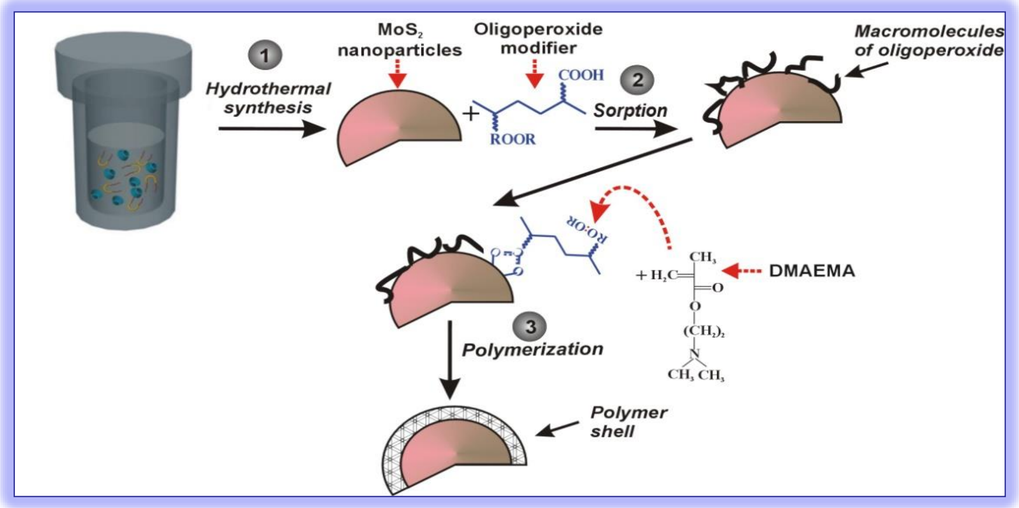


Рис. 19. Схема синтезу MoS_2/полімерного нанокомпозиту

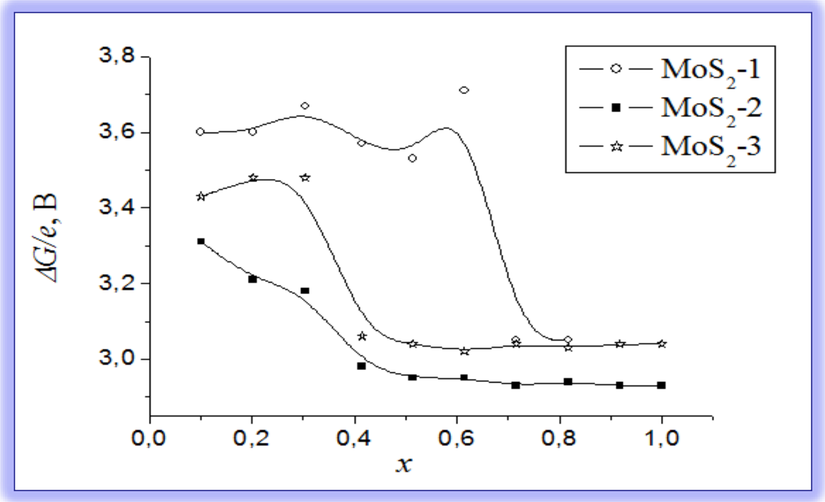


Рис. 20. Зміна енергії Гіббса (ΔG(x)) досліджуваних матеріалів від ступеня "гостьового" навантаження x

Придатними до Li^+-інтеркаляційного струмотворення є матеріали на основі структур шаруватого типу: синтезований вихідний та полімеризований MoS_2, оброблені ультразвуком у різних середовищах природні мінерали тальку та пірофіліту, що підтверджується результатами зміни енергії Ґіббса. Ультразвукова обробка останніх призводить до змін енергетичного рельєфу мінералів, внаслідок виникнення додаткового бар'єру для перенесення заряду.

Після поверхневої модифікації літій-допованим олігопероксидом розрядна ємність MoS_2 суттєво зростає: більш як у 2 рази для матеріалу з меншою кількістю привитого полімеру, та в 1,9 рази для матеріалу з більшою його кількістю. Енергоємність і структура розрядної кривої залежать від кількості привитого літій-вмісного олігопероксиду до поверхні наночастинок MoS_2.

НАНОГІБРИДИЗОВАНІ СТРУКТУРИ ДЛЯ КВАНТОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ І ПРИСТРОЇВ НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

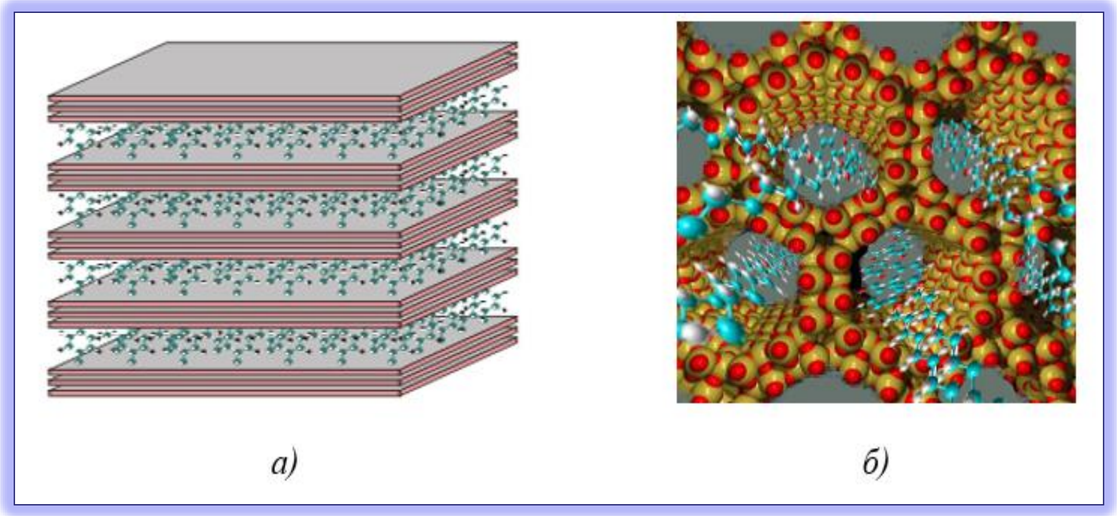


Рис. 21. Схематичне зображення фрагментів органічно/напівпровідникових (а), органічно/діелектричних (б) структур

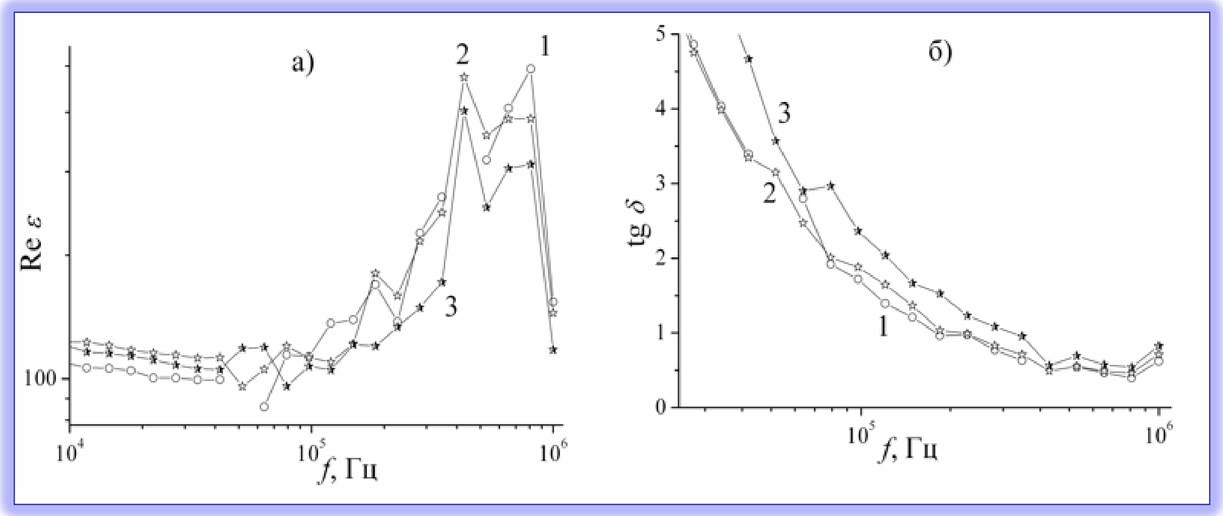


Рис. 22. Частотні залежності реальної складової діелектричної проникності (а) та тангенса кута електричних втрат (б) для напрямку, перпендикулярного до шарів наноструктури GaSe<РК>, виміряні до (1) і після 5 хв (2) та 15 хв (3) УЗ опромінення

Інноваційні низькорозмірні наногібридизовані структури на основі напівпровідникових шаруватих кристалів GaSe та мезопористих матриць MCM-41, відповідно, інтеркальованих та інкапсульованих сегнетолектричним рідким кристалом (РК) є ефективними матеріалами наноелектроніки та енергетики. Поляризаційними та струмопровідними характеристиками цих матеріалів можна керувати дією зовнішніх фізичних полів. Такими полями слугує ультразвукове та мікрохвильове електромагнітне опромінення.

ІНКАПСУЛЬОВАНІ РІДКИМ КРИСТАЛОМ МЕЗОПОРИСТІ МАТРИЦІ MCM-41 У ЗОВНІШНІХ ФІЗИЧНИХ ПОЛЯХ

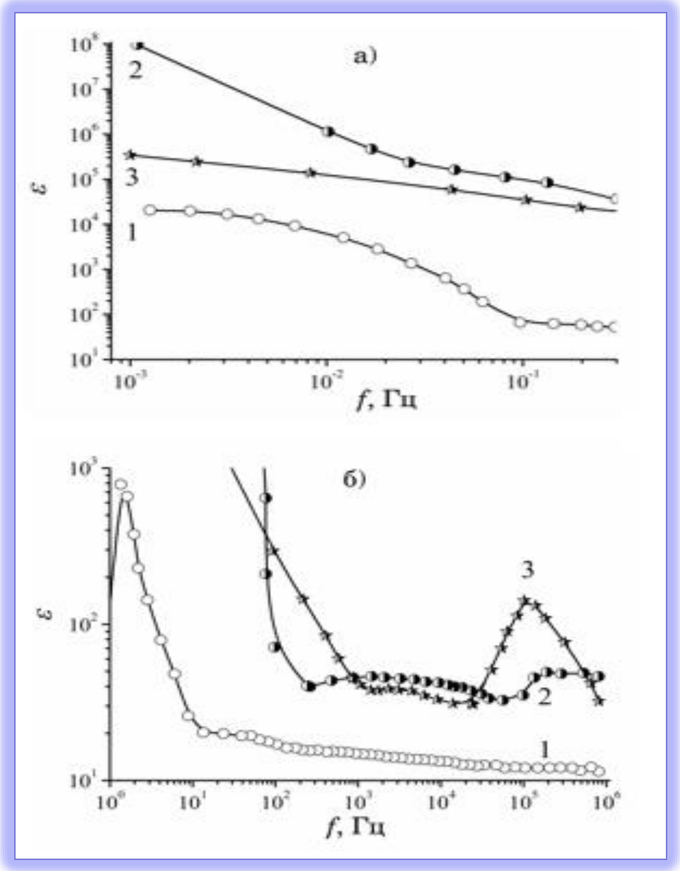


Рис. 23. Частотні залежності діелектричної проникності (при інфранизьких частотах (а) та в інтервалі 1 – 10^6Гц (б)) вихідної матриці MCM-41(1), наногібриду MCM-41<РК> до (2) та після (3) УЗ

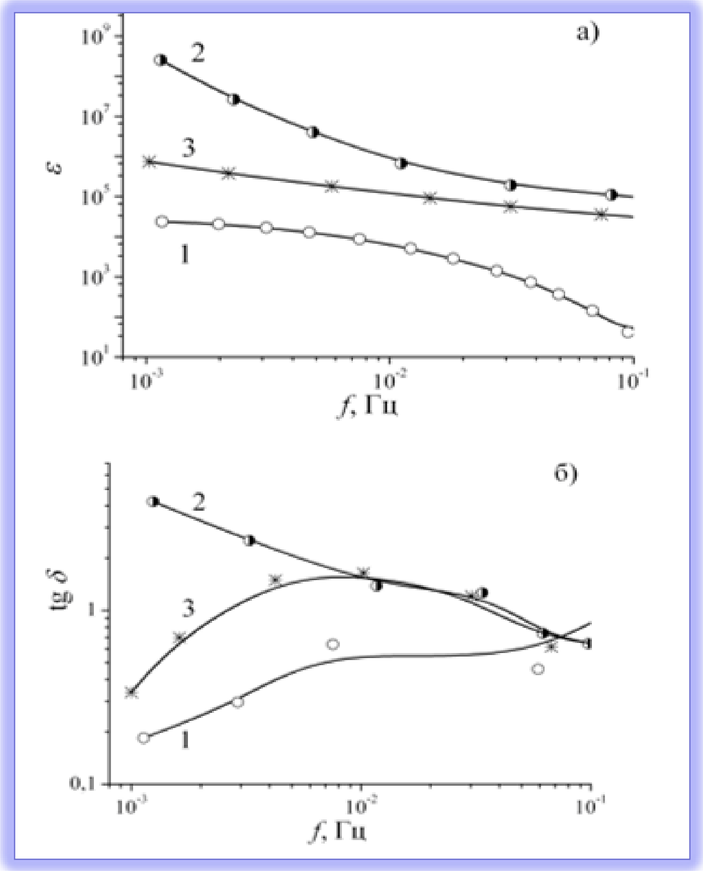


Рис. 24. Частотні залежності діелектричної проникності (а) та тангенс кута втрат (б) вихідної матриці MCM-41(1), наногібриду MCM-41<РК> до (2) та після (3) мікрохвильового опромінення

Встановлено, що ультразвукове опромінення істотно впливає на процеси струмопроходження в наноструктурі GaSe<РК>, але слабше міняє поляризаційні процеси. Крім цього навіть, у низькочастотній області, призводить до зростання діелектричної проникності наногібриду MCM-41<РК> від високого, ~$3*10^6$, до гігантського, $3*10^8$, значення, а також до зменшення тангенса кута електричних втрат (<1). Останнє поєднання відкриває новий підхід до створення квантових акумуляторів, у яких акумулювання і зберігання енергії реалізується шляхом накопичення і зберігання легких електронів на міжфазних межах наноструктурованих систем. Вплив мікрохвильового опромінення на наногібрид GaSe<РК> спричиняє ефект індуктивності ($5,5*10^6$ Гн/см^2) в такій наноструктурі. Опромінені ультразвуком структури MCM-41<РК> та GaSe<РК> мають практичне використання як матеріали радіочастотних конденсаторів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНАРНИХ СТРУКТУР КВАНТОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ НАНОШАРІВ НА ПОЛІБЕНЗІМІДАЗОЛЬНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАНОЛИСТАХ

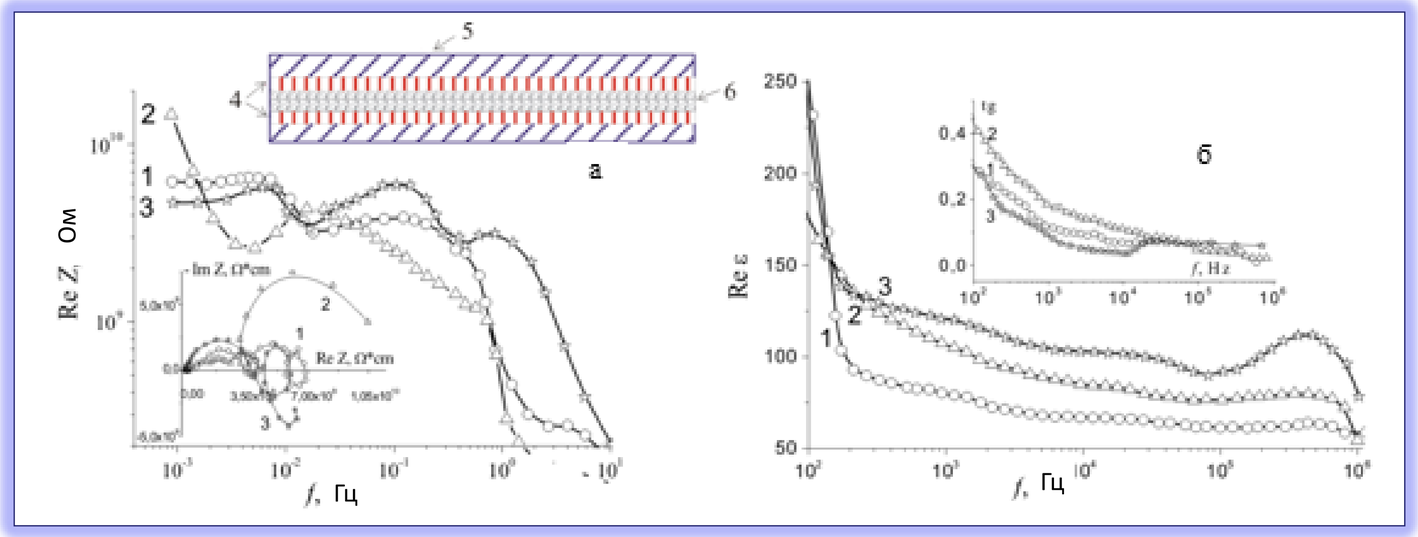


Рис. 25. Низькочастотні залежності реальної складової питомого комплексного імпедансу (а) та діелектричної проникності (б) для різного складу наношару ПБІ структур № 1–3. На вставці (а) – відповідні діаграми Найквіста; схематична структура НВМ: 4 – ПВА–МП (або полі(ВА–ВЕП–МА)), 5 – прищеплена функціональна полімерна оболонка, 6 – ПБІ; (б) – відповідні залежності тангенса кута електричних втрат

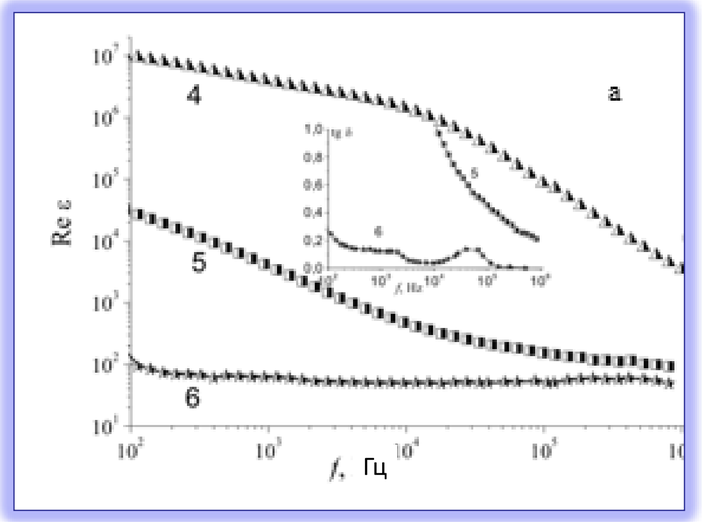


Рис. 27. Частотні залежності діелектричної проникності структур № 4–6. На вставці – відповідні залежності тангенса кута електричних втрат

Синтезовані нові наноструктурні волоконні матеріали з прищепленими до поверхні функціональними полімерними щітками. Залежно від природи таких щіток, а також від складу вихідних волоконних матеріалів, наношари володіють новими неочікуваними властивостями і їх можна використовувати у квантових акумуляторах, надвисокоємних конденсаторах для потужних генераторів інфразвукових електромагнітних хвиль.

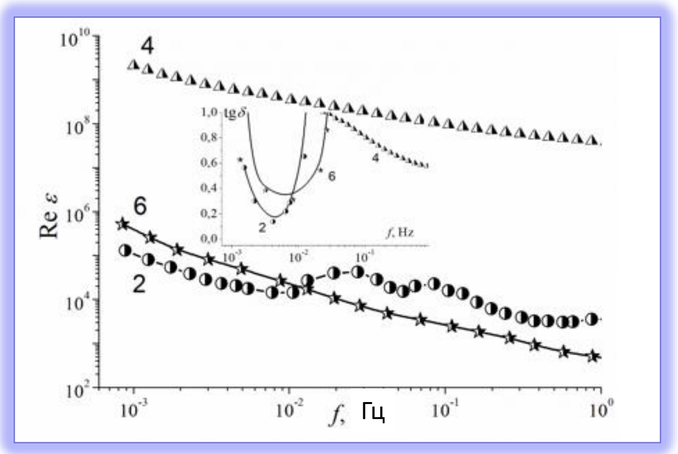


Рис. 26. Інфранизькочастотні залежності діелектричної проникності для структур № 4, 2, 6. На вставці –тангенс кута електричних втрат

ЕЛЕКТРОННИЙ СПЕКТР НАНООБ’ЄКТІВ У ЗОВНІШНЬОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

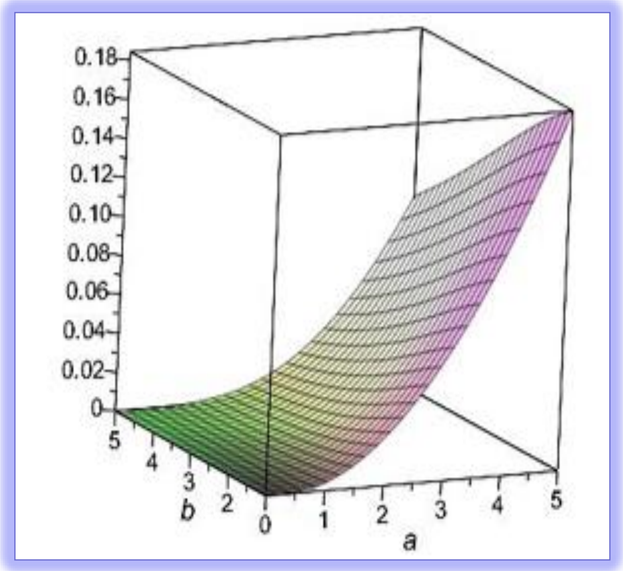


Рис. 28. Залежність 2-ї поправки від розмірів нанооб’єкту в XOY-площині у випадку калібровки Ландау, (магнітне поле орієнтоване вздовж напрямку OZ) (a, b в нм)

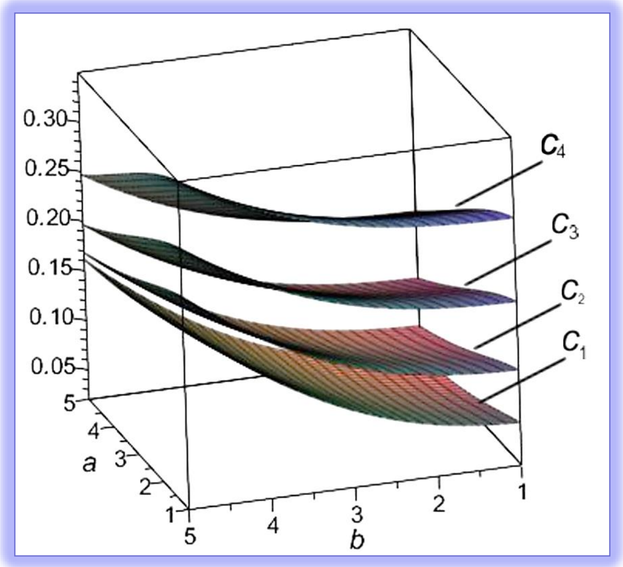


Рис. 29. Залежність 2-ї поправки в перерахунку на одиниці від геометричних параметрів в площині у випадку (магнітне поле є орієнтоване в площині) при 3, 4, 5, 6 (a, b в нм)

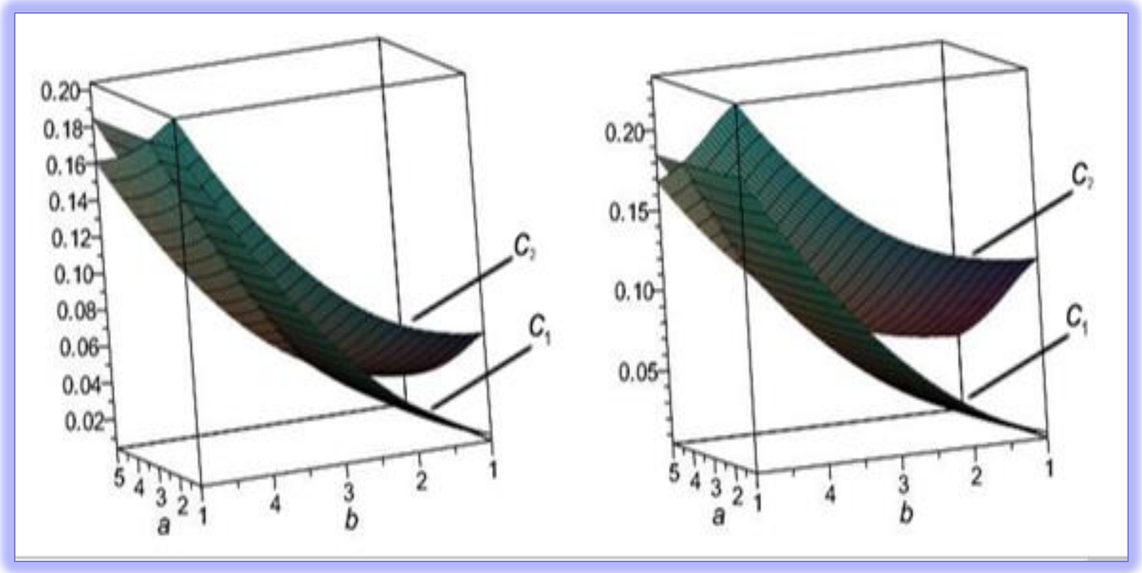
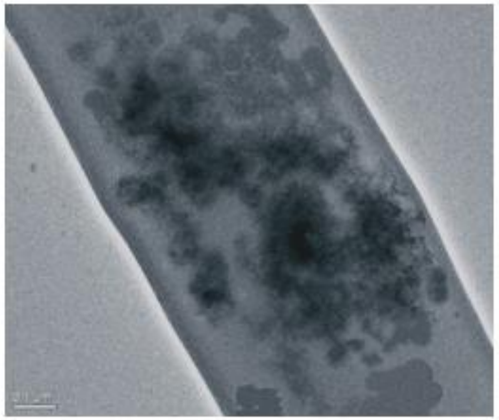


Рис. 30. Залежність другої поправки від геометричних параметрів в площині у випадку (магнітне поле орієнтоване в площині) при c1= 1; c2=3 нм (а) і c1=1; c2=4 нм (б) (a, b в нм)

На рис. 28-30 поправка перерахована на одиниці $\left[-\left(\frac{eB}{m}\right)^2 \cdot \left(\frac{32}{\pi^2}\right)^2 \frac{2\cdot 10^{-18}\cdot m}{\pi^2}\right]$

Дискретність спектра є одним із визначальних факторів своєрідних властивостей нанооб'єктів, накладання зовнішнього магнітного поля є додатковим фактором впливу на ці властивості. В рамках теорії збурень поправка на спектр нанооб’єкта паралелепіпедоподібної форми, поміщеного у зовнішнє магнітне поле, з'являється лише з другого члена і вище. Величини поправок для нанооб’єктів у зовнішньому магнітному полі залежать від величини магнітного поля та від його орієнтації відносно нанооб'єкта.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТІВ НВМ/γ-Fe_2O_3 У МАГНІТНОМУ ПОЛІ



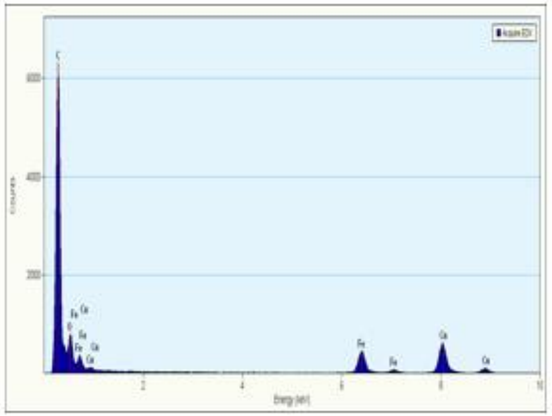
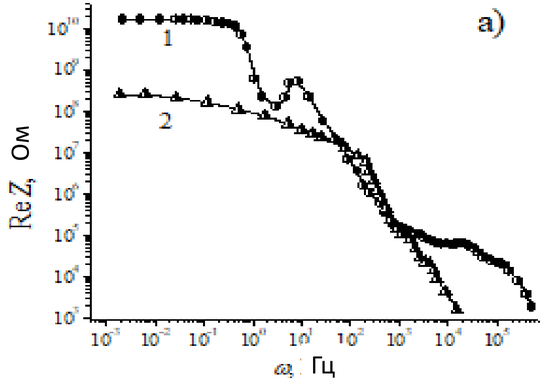


Рис. 31. ТЕМ-зображення фрагменту структури (а) та результати EDX-аналізу (б) нанокомпозиту НВМ/γ-Fe_2O_3



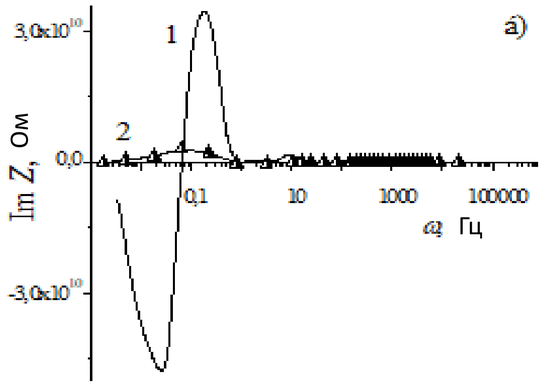
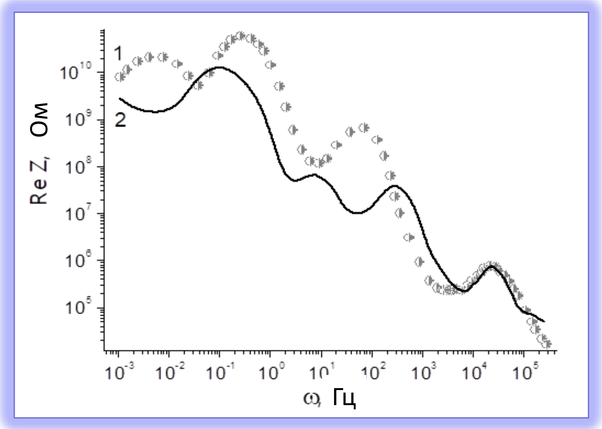
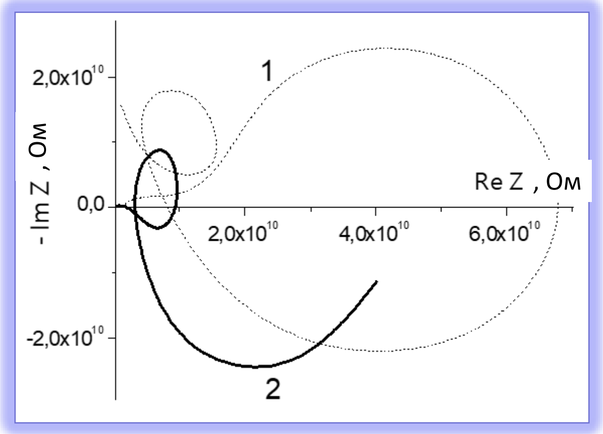


Рис. 32. Частотні залежності реальної (а) та уявної (б) складових комплексного імпедансу, виміряні перпендикулярно до поверхні НВМ/γ-Fe_2O_3 за НУ (1) та в МП (2).

Синтезовані інноваційні нановолоконні композитні матеріали (НВМ/γ- Fe_2O_3) на основі полівінілпіролідону, наповненого магнітними наночастинками γ-Fe_2O_3, при чому вміст магеміту становить 10% мас. Матеріалу НВМ/γ-Fe_2O_3 притаманне явище "від'ємної" ємності, що відповідає за можливість використання матеріалу в наноелектроніці для створення безгіраторних ліній затримки. За нормальних умов (НУ) у високочастотній області ($10^2 \div 10^6$ Гц) матеріал НВМ/γ-Fe_2O_3 можна застосовувати для виготовлення високоефективних конденсаторів радіочастотного діапазону, а у магнітних полях (МП) – магнетоварікапів високої добротності.



а



б

Рис. 33. Частотні залежності реальної складової питомого комплексного імпедансу та діаграми Найквіста уздовж поверхні НВМ/γ-Fe_2O_3, виміряні за НУ (1) та в МП (2)

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НВМ/γ-Fe_2O_3 У ПОСТІЙНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ

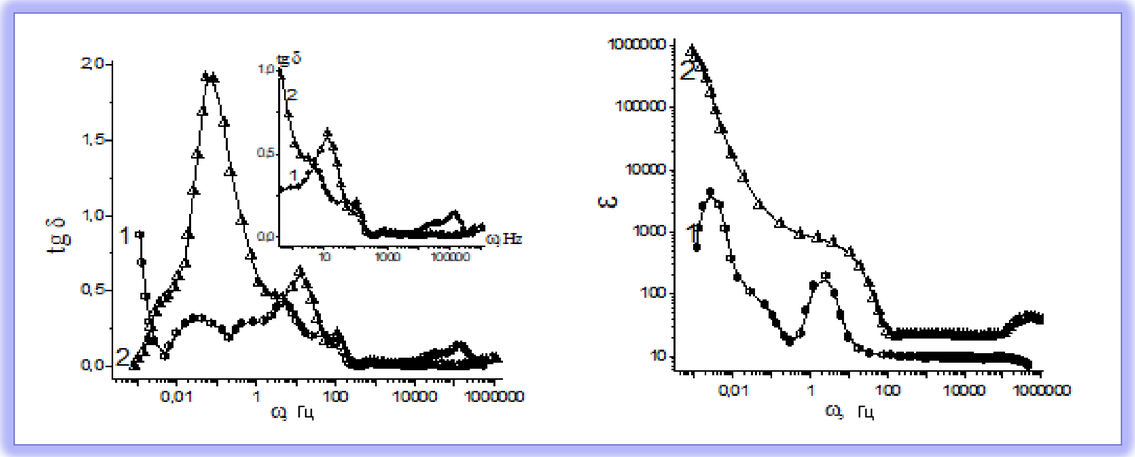


Рис. 34. Частотні залежності tg δ (а) і ε (б), виміряні перпендикулярно до поверхні НВМ/γ- Fe_2O_3 за НУ (1) та в МП (2)

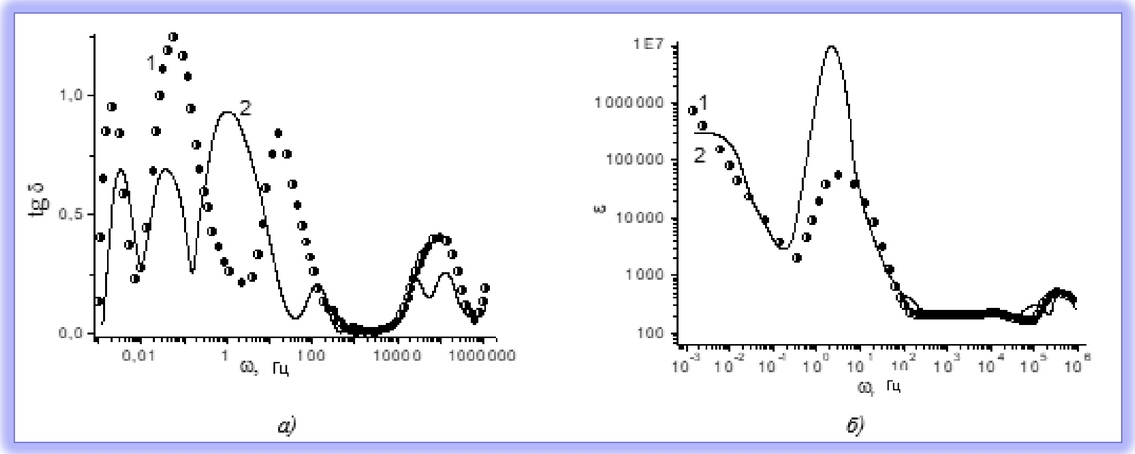


Рис. 35. Частотні залежності тангенса кута електричних втрат (а) і діелектричної проникності (б), уздовж поверхні НВМ/γ-Fe_2O_3, виміряні за НУ (1) та в МП (2)

У інфранизькочастотній області (0,001 ÷ 0,02 Гц) і за нормальних умов для НВМ/γ-Fe_2O_3 властиве поєднання високих значень діелектричної проникності з тангенсом кута втрат, меншим від одиниці, що робить матеріал перспективним як активний елемент квантового акумулятора; а у магнітному полі для нього притаманним є «spin-battery» ефект, величиною 410 мВ, що майже у 23 рази є вищою від відомої на сьогодні, але при 3 К. Прикладання магнітного поля призводить до виникнення гігантського від'ємного магніторезистивного (8100%), а також магнітоємнісного (4000%) ефекту у НВМ/γ- Fe_2O_3. Останнє забезпечує використання матеріалу, як високочутливого сенсору магнітного поля.

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ:

1. Bishchaniuk, T. M. Electronic processes and energy storage in inorganic/organic nanohybrids / T. M. Bishchaniuk, **O. V. Balaban**, R. Ya. Shvets, I. I. Grygorchak, A. V. Fechan, B. A. Lukiyanets, F. O. Ivashchyshyn // Molecular crystals & liquid crystals. – 2014. – V. 589, № 3. – P. 132–140.
2. Grygorchak, I. I. New materials for „quantum" storage of electric power / I. I. Grygorchak, B. A. Lukiyanets, **O. V. Balaban**, T. M. Bishchaniuk, R. Ya. Shvets // Materials science in semiconductor processing. – 2014. – V. 26. – P. 690–694.
3. **Balaban, O.** Fabrication of 1D-Nanofiber/Fe2O3 Composites with Tailored Magnetic Properties / **O. Balaban**, I. Grygorchak, N. Mitina, A. Zaichenko, B. Lukiyanets, V. Glasunova, A.Borysiuk, M. Larkin, O. Hevus, N. Pokladok, V. Datsyuk, S. Trotsenko // Journal of Nanoscience and Nanotechnology.– 2019. – Vol. 19– P. 3871–3878.
4. **Balaban, O. V.** Investigation of the planar structures of quantum functional polymeric nanolayers on polybenzimidazole fiber nanosheets / **O. V. Balaban**, I. I. Grygorchak, A. I. Kondyr, O. S. Zaichenko, N. E. Mitina, V. V. Datsyuk, S. E. Trotsenko, O. S. M'yahkota // Materials Science. – 2017. – Vol. 53,№ 2– P. 179-185.
5. **Balaban, O. V.** The ultrasonic modification of thermodynamic and kinetic regularity of lithium intercalation in talc / **O. V. Balaban**, I. I. Grygorchak, R. M. Peleshchak, O. V. Kuzyk, O. O. Dan'kiv // Progress in natural science: materials international. – 2014. – V. 24, №4. – P. 397–404.
6. Lukiyanets, B. A. Quantum Capacitance of Nanoplates in Magnetic Field / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka** // International Journal of Nanoscience. – 2016. – Vol.15, №1-2. – P. 1650009-1–1650009-6.
7. Hryhorchak, I.I. New carbon architectures with nanobounded geometry of voids for the high-efficiency capacitive and pseudocapacitive accumulation of energy / Hryhorchak I.I., Borysyuk A.K., Shvets', R.Y. Kondyr, A.I., Ivashchyshyn, F.O., Balaban, O.V., Kurepa, A.S. // Materials Science. – 2015. – Vol.2, – P. 42-47.
8. Balaban, O.V. Effect of ultrasonic treatment on the properties of pyrophyllite and thermodynamic and kinetic regularities of its intercalation with Lithium / O.V. Balaban, I.I. Hryhorchak, A.I. Kondyr // Materials Science. – 2014. – T. 50, № 1. – C. 109–116.
9. Lukiyanets, B. A. Peculiarities of electron-electron interaction in quantum dimensional objects / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka** // Journal of Nano- and Electronic Physics – 2018. – Vol.10, №2. – P. 1–6.
10. Lukiyanets, B. A. Size effects of a nanoobject in magnetic field / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka** // Condensed Matter Physics. – 2019. – Vol.22, №2. – P. 23704-1–23704-8.
11. Lukiyanets, B. A. Electronic spectrum of intercalated layered crystals: Model analysis / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka**, I. Hryhorchak // Journal of Nano- and Electronic Physics – 2018. – Vol.10, №6. – P. 06007-1– 06007-5.
12. Lukiyanets, B. A. Quantum mechanical effects in the Coulomb interaction of electrons which are localized in opposite double electron layers / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka** // Mathematical modeling and computing. – 2016. – Vol.3, №2. – P. 173–176.
13. Lukiyanets, B. A. Effect of magnetic field on quantum capacitance of the nanoobject / B. A. Lukiyanets, **D.V. Matulka** // Mathematical modeling and computing. – 2015. – Vol.2, №2. – P. 176-182.