

І.М. Будзуляк¹, О.В. Морушко¹, Д.І. Попович², Л.С. Яблонь¹

СТРУКТУРНІ ЗМІНИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОННОЇ ПІДСИСТЕМИ АКТИВОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ, ІНІЦІЙОВАНІ ЛАЗЕРНИМ ОПРОМІНЕННЯМ

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна

²Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Підстригача НАН України,
вул. Карпатська, 15, 76019 Львів, Україна

Метами ЕПР, мессбауерівської спектроскопії встановлені зміни в поведінці електронної підсистеми активованого вуглецю після дії лазерного опромінення. Показано, що на розвиненій поверхні активованого вуглецю наявні три стани кислотних груп, що відповідають різним порам. Легування Mn, Cr та Fe призводить до утворення центрів локалізації електронів, які під дією лазерного опромінення змінюють свій енергетичний стан.

Ключові слова: пористий вуглецевий матеріал, електронна підсистема, лазерне опромінення.

Карбонізація й активація матеріалу рослинного походження в присутності пороутворювача (водяної пари) призводить до структурних перетворень вихідної матриці, у результаті чого формується пористий матеріал із питомою поверхнею 800–1 000 м² та пористістю 50–70 % [1; 2]. Залежно від структурних особливостей рослинної сировини, у пористому матеріалі формуються фрактали у формі ланцюгів, сіток та тривимірних структур, які містять зв'язки С-С σ - та π -типу.

Функціональні особливості рослинної сировини та температура й тиск у реакторі при її карбонізації та активації в автоклаві можуть призвести до формування фрагментів, здатних зв'язувати метали в комплекси. Підтвердженням існування кислотних груп є результат проведення лужного титрування матриці пористого вуглецевого матеріалу (ПВМ) [3].

Із кривої титрування видно, що процес відбувається поетапно й указує на диференціацію у виявленні кислотних властивостей карбоксильних груп, спряжених з електронною структурою та просторовою організацією фрагментів матриці в місцях їх іммобілізації (локалізації). Співвідношення між кількістю витраченого лугу на кожному з етапів корелює зі співвідношенням відповідних станів карбоксильних груп. З рис. 1 можна зробити висновок, що різні типи карбоксильних груп співвідносяться як 1 : 3 : 6.

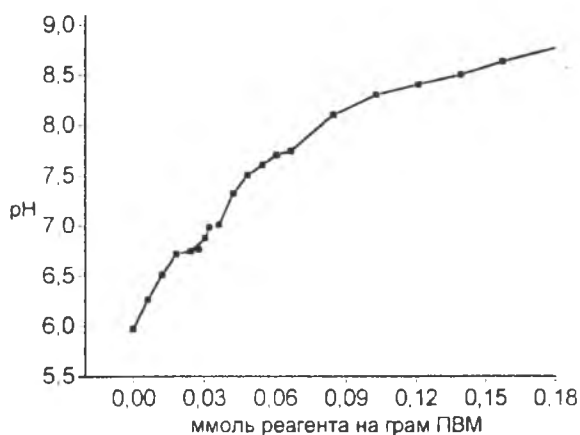


Рис. 1. Крива титрування матриці ПВМ розчином NaOH

Відомо, що в умовах дії технологічних чинників можуть ініціюватись окисно-відновні процеси, формуватись дефекти структур і відбуватись гомолетичні розриви зв'язків, які в сукупності спричиняють формування зон локалізації неспарених електронів [4]. Для виявлення зазначених ефектів нами було знято спектри ЕПР. Зміни електронної підсистеми ПВМ, легуваних металами, визначалися на спектрометрі ELEXSYS E-500 фірми BRUKER з одночасним контролем частоти в області 9 800 МГц і напруженості магнітного поля за кімнатної температури.

Дійсно, у спектрах ЕПР (рис. 2) спостерігається суперпозиція сигналів, параметри яких наведені в табл. 1. Уміст неспарених електронів за оцінкою [5] становить приблизно 10^{17} спінів на 1 грам ПВМ.

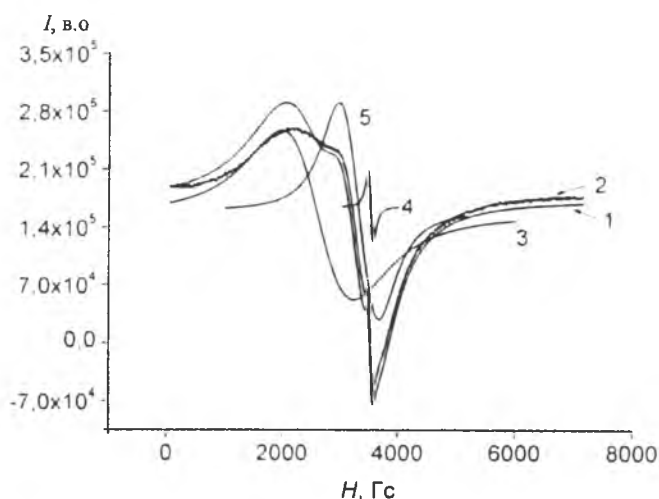


Рис. 2. Спектр ЕПР для вихідного ПВМ

Як видно з рис. 2, у спектрі ЕПР можна ідентифікувати три типи парамагнітних центрів. Виходячи з результатів елементного аналізу, які показують відсутність значного вмісту інших елементів, крім вуглецю, кисню та водню, можна очікувати розподіл спінової густини між центрами, які сформовані в основному атомами вуглецю. Основними характеристиками спектрів ЕПР є g -фактор, що визначається за формулою $g = \nu / (1,4 \cdot H_p)$ та ΔH – ширина піка. Параметри ЕПР (g , ΔH) свідчать про існування колективізованих станів електронів із великою швидкістю міжелектронного обміну, тобто коротким часом життя електронів у певних визначених станах (міграція вздовж ланцюгів, фрагментів, у тому числі й за участю масивної матриці).

Таблиця 1

Характеристики ЕПР спектрів ПВМ

Зразок	g	ΔH	$I/I_{\text{заг}}$	X^*
ПВМ	2,696	680,5989	0,58	e^{\bullet}
	2,119	569,7772	0,4	$e^{\bullet\bullet}$
	1,996	20,12962	0,02	$e^{\bullet\bullet\bullet}$
ПВМ + 0,6 % Mn	8,328	770	0,13	e^{\bullet}
	3,942	1 070	0,79	$e^{\bullet\bullet}$
	2,319	270	0,02	$e^{\bullet\bullet\bullet}$
	1,999	480	0,06	Mn^{2+}
ПВМ + 0,6 % Mn + лазер	6,015	1 260	0,49	e^{\bullet}
	3,563	1 650	0,38	$e^{\bullet\bullet}$
	2,303	390	0,04	$e^{\bullet\bullet\bullet}$
	1,996	450	0,09	Mn^{2+}
ПВМ + 20 % Fe + лазер	5,155	1 330	0,27	e^{\bullet}
	3,627	760	0,03	$e^{\bullet} + Fe_5O'$
	2,285	2 040	0,62	$e^{\bullet} + Fe_5O$
	2,093	605	0,08	$e^{\bullet} + Fe_6O$
ПВМ + 20 % Fe + лазер + рік	4,331	1 250	0,12	$e^{\bullet} + Fe_4O$
	2,142	1 430	0,88	$e^{\bullet} + Fe_6O$
ПВМ + 0,4 % Cr	4,139	1 800	0,62	e^{\bullet}
	2,626	2 240	0,379	$e^{\bullet\bullet}$
	1,987	116	0,001	Cr^{3+}
ПВМ + 0,4 % Cr + лазер	2,093	675	0,999	e^{\bullet}
	1,999	100	0,001	Cr^{3+}

У процесі отримання ПВМ далеко не завжди вдається досягнути заздалегідь визначених параметрів, зокрема, питомого опору та питомої ємності ПЕШ, утвореного на межі розділу ПВМ/електроліт [6; 7], тому для досягнення оптимальних експлуатаційних характеристик ЕК, ПВМ модифікують в умовах дії різноманітних чинників. До таких належать хімічна обробка ПВМ [8], додаткова термічна обробка [9], легування металами з високою електронною питомою густиною [10; 11].

Виходячи із загальних фізичних принципів і топології розвиненої поверхні, одним зі шляхів вирішення даної проблеми є збільшення густини електронних станів у матриці ПВМ та залучення якомога більшої частини розвинутої поверхні до утворення ПЕШ, бо, як відомо [12], до 50 % поверхні пор не змочуються водним електролітом через свої хіміко-структурні особливості. Ця ідея була реалізована шляхом модифікації ПВМ легуванням металами з високою густиною електронних станів, що відкрило перспективу істотно збільшити ємність ПЕШ, а відповідно, і конденсаторів, сформованих на основі модифікованого, указаним чином, ПВМ. Проте методика легування не забезпечує локалізації металу на поверхні ПВМ. У результаті цього при багаторазовому циклюванні ЕК атоми металів вимиваються електролітом і параметри ЕК погіршуються. З метою запобігання цього явища ми проводили додаткову обробку легуваного ПВМ опроміненням неодимового лазера, що працював в імпульсному режимі.

Спектри ЕПР, зняті від ПВМ, легуваного марганцем, указують на наявність декількох типів парамагнітних центрів, які зумовлюють суперпозицію відповідних сигналів (рис. 3, табл. 1).

Зівставлення параметрів ЕПР різних валентних форм марганцю з урахуванням умов зйомки та параметрів сигналів ЕПР модифікованої матриці було встановлено, що тільки сигнал з параметром $g = 1,999$ відповідає Mn^{2+} . Решта форм є електронами, делокалізованими між фрагментами матриці різної природи. Оскільки інтегральна інтенсивність лінії пропорційна кількості неспарених електронів відповідного типу, то доля неспарених електронів електронної оболонки Mn^{2+} незначна й складає менше 10 % (табл. 1).

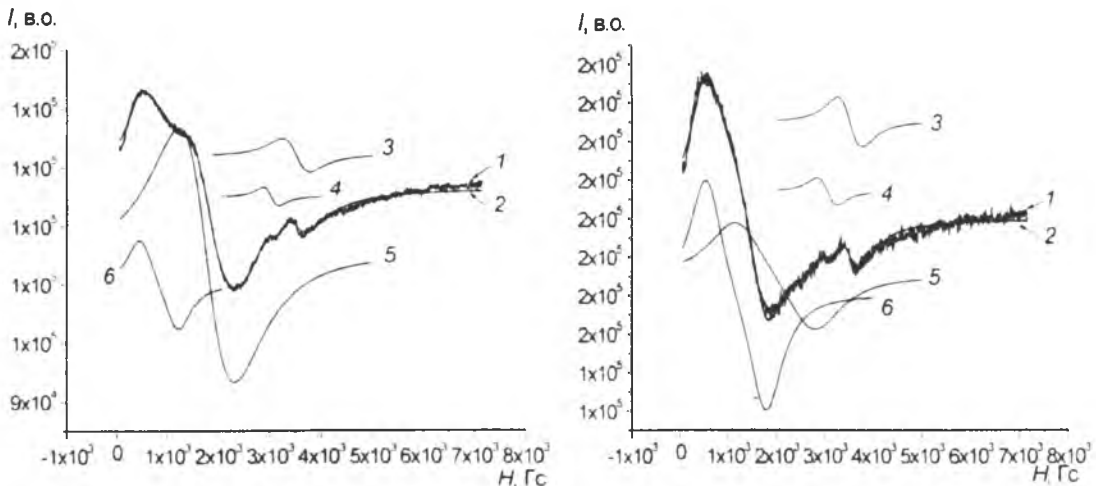


Рис. 3. Спектри ЕПР для ПВМ модифікованого Mn до (а) та після (б) опромінення імпульсами лазера: 1 – експериментальний; 2 – результат моделювання; 3 – Mn^{2+} ; 4, 5, 6 – колективізовані електрони

При імпульсному опроміненні лазером ПВМ, легуваного марганцем, відбувається перерозподіл електронів між їх різними станами. Частина електронів переходить зі стану з $g = 3,9$ у стан $g = 6,0$, тобто зростає їх рухливість. Таким чином, лазерне опромінення понижує потенціальні бар'єри, які перешкоджають переходу електронів з одного стану до іншого, тобто воно ініціює зшивання мостиків. Ці дані корелюють із результатами досліджень ПВМ, легуваного марганцем, методом малокутового розсіювання рентгенівських променів, які вказують на структурні перетворення, що відбуваються під час дії лазерного опромінення.

Для оцінки коректності даного припущення було проведено кислотне титрування модифікованого марганцем ПВМ до та після лазерного опромінення. Титрування, як і у випадку вихідного ПВМ (рис. 1), має ступінчастий характер. Для ПВМ, легуваного марганцем, титрування відбувається в три етапи, що свідчить про існування трьох типів функціональних груп, які піддаються титруванню (рис. 4, а). Проте після лазерного опромінення відбувається зменшення кількості етапів, а відповідно, і типів функціональних груп (рис. 4, б).

При цьому стан марганцю практично не змінюється. Тому можна припустити, що роль марганцю зводиться до участі центрів його локалізації в процесах генерування колективізованих електронів і зміни їх стану.

Подібна ситуація спостерігається й при легуванні ПВМ іонами хрому. Частка інтегральної інтенсивності сигналу Cr^{3+} у загальній інтенсивності спектра всіх неспарених електронів у системі ЕПР складає менше 1 % (рис. 5, а). Опромінення лазером переводить усі колективізовані

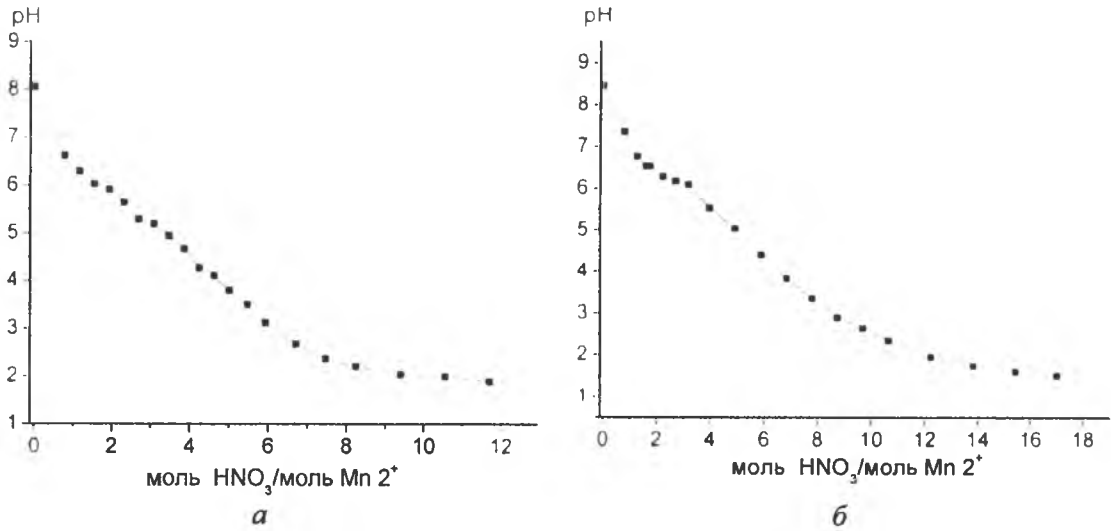


Рис. 4. Титрування ПВМ модифікованого Mn до (а) та після (б) лазерного опромінення 0,1 молярним розчином HNO_3

електрони до одного стану, який характеризується сигналом у спектрі ЕПР із параметрами $g = 2,09$, $\Delta H = 675$ (табл. 1). Проте, на відміну від зразка, легованого марганцем, дані параметри спектрів ЕПР свідчать про зменшення рухливості електронів. Аналіз форми лінії ЕПР лазерно опроміненого ПВМ, легованого хромом, показує, що реально спостережений сигнал являє собою суперпозицію сигналів, домінуючих у системі делокалізованих електронів і неспарених електронів Cr^{3+} , доля яких становить 0,1 % (рис. 5, б).

Слід звернути увагу на зменшення загальної концентрації неспарених електронів у зразках, модифікованих металами ПВМ, до значення $\sim 10^{14}$.

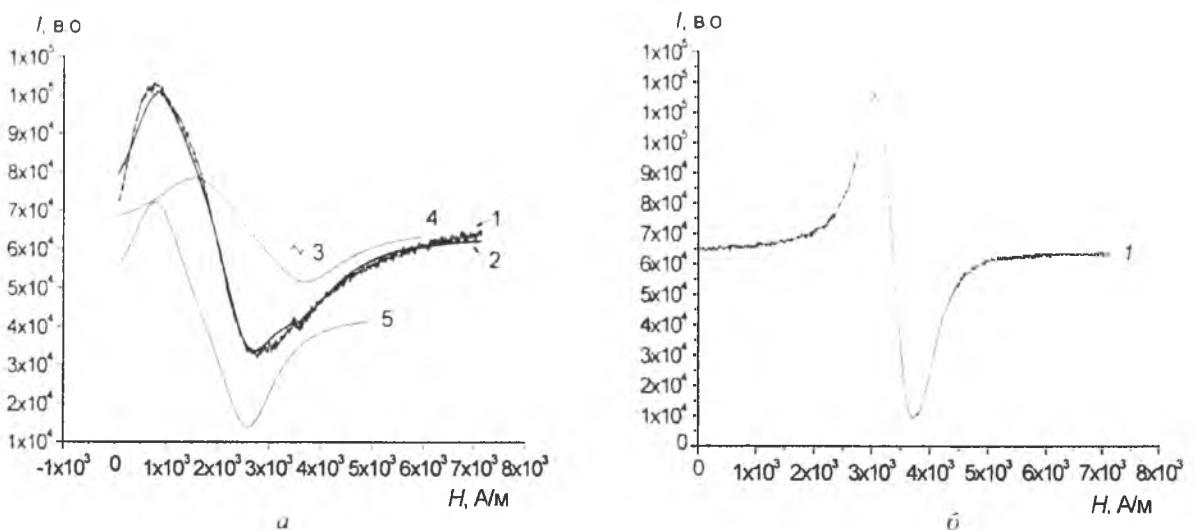


Рис. 5. Спектри ЕПР для ПВМ, модифікованого Cr до (а) та після (б) опромінення імпульсами лазера: 1 – експериментальний; 2 – результат моделювання; 3 – Cr^{3+} ; 4, 5 – колективізовані електрони

У спектрах ЕПР залізовмісних зразків, опроміненних імпульсами лазера (рис. 6, а), спостерігаються лінії колективізованих електронів, концентрація яких складає один порядок з умістом заліза Fe^{3+} , яке ідентифікується в трьох формах із різними хромофорами $\text{Fe}_5\text{O}'$, Fe_5O , Fe_6O . Відомо [13], що іони заліза в хромофорі Fe_5O та у видозміненому хромофорі $\text{Fe}_5\text{O}'$ є хімічно

активними, і тому дані оточення є нестабільними в часі. Дійсно, аналіз ЕПР спектра даного зразка через рік після опромінення показав, що домінуючим хромофором іонів Fe^{3+} є FeO , який є найбільш стабільним в умовах хімічно активного середовища (H_2O , CO_2 , O_2) (рис. 6, б).

Аналізуючи дані хімічного титрування ПВМ, легованого 20 % Fe , опроміненого лазером (рис. 7), було виявлено формування сполук із сильно вираженою кислотною функцією, що пояснюється фотокаталітичним окисненням фрактальних структур вуглецевої матриці. Перебіг процесу титрування даних композицій відбувається аналогічно до лужного титрування вихідної матриці ПВМ після нейтралізації кислотних груп (рис. 1).

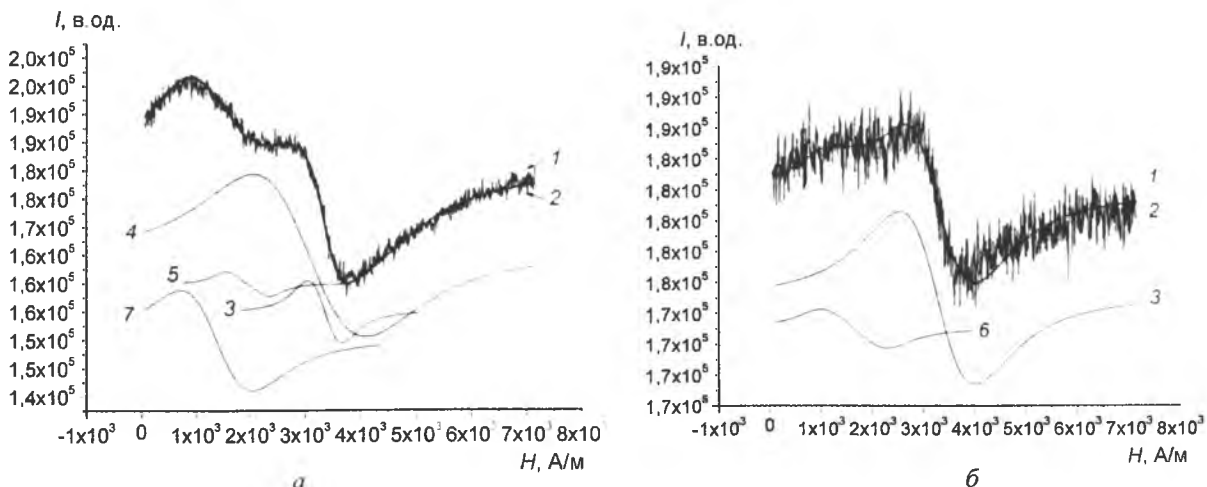


Рис. 6. Спектри ЕПР ПВМ модифікованого Fe , які опромінені імпульсами лазера (а) та опромінені імпульсами лазера після витримки протягом 1 року (б): 1 – експериментальний; 2 – результат моделювання; 3 – FeO ; 4 – Fe_5O ; 5 – Fe_5O' ; 6 – Fe_6O ; 7 – колективізовані електрони

Зівставлення кривих титрування зразків із вмістом 0,4 мас. % (рис. 4) та 20 мас. % (рис. 7) іонів металу підтверджує висновок щодо фотокаталітичного окиснювального збагачення зразків матриці сполуками з кислотною функцією.

Зміни зарядового стану та характеристик ближнього оточення іонів заліза, легованих у матрицю ПВМ, ініційовані лазерним опроміненням, вивчалися методом мессбауерівської спектроскопії (рис. 8). Мессбауерівський спектр ПВМ, легованого 20 % Fe^{57} (рис. 8, а), склада-

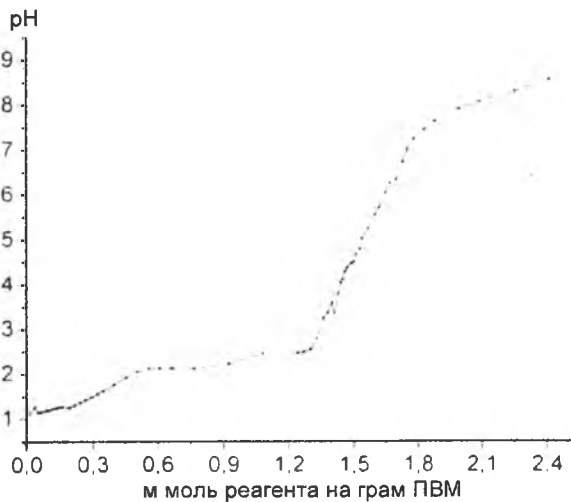


Рис. 7. Титрування матриці ПВМ, модифікованої 20 % Fe після лазерного опромінення 0,15 молярним розчином $NaOH$

ється із двох квадрупольних дублетів. Значення їх ізомерних зсувів відповідно $I_{S1} = 0,394$ мм/с та $I_{S2} = 0,385$ мм/с, а величини квадрупольного розщеплення становлять відповідно $Q_{S1} = 0,98$ мм/с та $Q_{S2} = 0,55$ мм/с. Згідно з даними [14], це свідчить про наявність у ПВМ ядер Fe^{57} в складі хімічних сполук $FeO_n \cdot nH_2O$ та $\beta-FeOOH$ або ж існування Fe^{3+} в нестійкому іонізованому стані. Наявність іонів Fe^{3+} у вільному стані в даному матеріалі є малоімовірною, оскільки на заключному етапі синтезу проводилося прожарювання за температури $300^\circ C$ протягом 1 год. Дублет із параметрами ($I_{S2} = 0,385$ мм/с, $Q_{S2} = 0,55$ мм/с) можна трактувати як результат резонансного

поглинання γ квантів ядрами Fe^{57} у сполуці $\beta\text{-FeOOH}$. Дублет із параметрами ($I_{S1} = 0,394$ мм/с, $Q_{S1} = 0,98$ мм/с) характеризується порівняно вищими значеннями квадрупольного розщеплення, що свідчить про наявність кисневих лігандів для іонів заліза – формування окта- та тетракомплексів із перерозподілом електронної густини між ядрами Fe та O і, відповідно, змінами ступеня ковалентності хімічного зв'язку від Fe^{3+} до Fe^{2+} , що в сполуці $\text{FeO}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Існування великої кількості вільних OH^- груп у даних матеріалах робить неможливим точне розділення вкладів окта- та тетракомплексів унаслідок спотвореної картини електричних квадрупольних взаємодій.

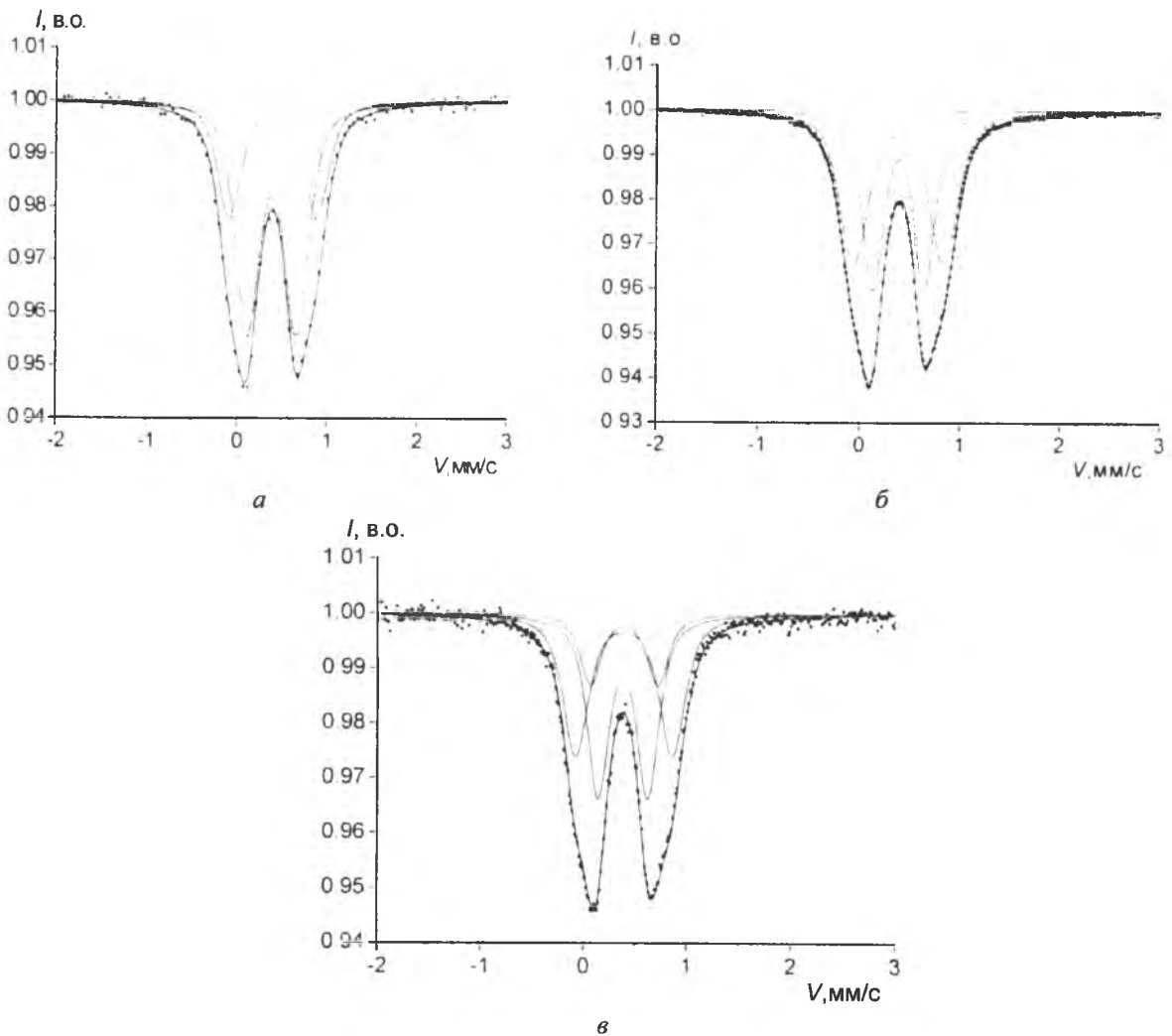


Рис. 8. Мессбауерівський спектр ПВМ та його інтерпретація за допомогою програми Univem 7.02: а – ПВМ, легований 20 % заліза; б – легований 20 % заліза ПВМ, опромінений лазером; в – легований 20 % заліза ПВМ, опромінений лазером після витримки протягом року

При імпульсному опроміненні лазером даного ПВМ відбуваються зміни в ближньому оточенні та характері взаємодій із ним для резонансних ядер Fe^{57} , що відображається на спектрі (рис. 8, б), який являє собою суперпозицію трьох квадрупольних дублетів. Дублети з параметрами $I_{S1} = 0,385$ мм/с, $Q_{S1} = 0,89$ мм/с та $I_{S2} = 0,383$ мм/с, $Q_{S2} = 0,51$ мм/с інтерпретуються як результат резонансу ядер Fe^{57} окта- та тетракомплексів Fe^{3+} у сполуках $\text{FeO}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$ та $\beta\text{-FeOOH}$ відповідно. Дублет із параметрами $I_{S3} = 0,248$ мм/с, $Q_{S3} = 0,25$ мм/с відповідає наявності в зразку іонів заліза Fe^{3+} в складі комплексу $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6$. Даний аквакомплекс може локалізуватися в порах діаметром 3–5 нм. Механізм формування комплексу $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6$ під дією лазерного опромінення потребує додаткового вивчення. Іонізуючий вплив лазерного опромінення проявляється в зменшенні параметрів компонентів спектра – дублетів, що відповідають окта- та тетракомплексам Fe^{3+} в сполуках $\text{FeO}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$ та $\beta\text{-FeOOH}$ (рис. 8, а).

Це вказує на зміщення ступеня валентності іонів заліза до стану Fe^{3+} . Лазерне опромінення також приводить до перерозподілу відносного вмісту сполук $\text{FeO}_n \cdot n\text{H}_2\text{O}$ та $\beta\text{-FeOOH}$ – з

відношення відповідно 34 %/66 % у вихідному зразку до 51 %/44 % та 4 % Fe^{3+} в складі аквакомплексу після опромінення.

Мессбауерівський спектр опроміненого ПВМ, витриманого протягом року (рис. 8, в), складається також із трьох квадрупольних дублетів. Дублети з параметрами $I_{S1} = 0,389$ мм/с, $Q_{S1} = 0,94$ мм/с та $I_{S2} = 0,392$ мм/с, $Q_{S2} = 0,65$ мм/с можна трактувати аналогічно до вихідного спектра (рис. 8, а) як результат резонансу ядер Fe^{57} окта- та тетракомплексів Fe^{3+} в сполуках $\text{FeO}_n \cdot \text{H}_2\text{O}$ та b-FeOOH відповідно. Дублет із параметрами $I_{S3} = 0,382$ мм/с, $Q_{S3} = 0,48$ мм/с також можна поставити у відповідність сполуці b-FeOOH , яка утворюється в результаті розпаду аквакомплексу $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6$.

Унаслідок витримки протягом 1 року в результаті адсорбції вихідним матеріалом із повітря додаткових OH^- груп з'являються додаткові усупільнені електрони і, як наслідок, валентність іонів заліза в сполуках $\text{FeO}_n \cdot \text{H}_2\text{O}$ та b-FeOOH зміщується в сторону Fe^{2+} , на що вказує збільшення значень ізомерних зсувів та квадрупольних розщеплень усіх мессбауерівських дублетів. Витримка також приводить до нівелювання впливу лазерної обробки – параметри мессбауерівських спектрів та вміст фаз практично відновлюються.

Відсутність зееманівських секстетів в отриманих спектрах свідчить про те, що хімічне допування іонами заліза та лазерне опромінення не призводить до утворення карбідів заліза, тобто іони заліза не проникають у структуру зерен вуглецю. Натомість утворення сполук $\text{FeO}_n \cdot \text{H}_2\text{O}$ та b-FeOOH , про що свідчать кількісні характеристики квадрупольних дублетів, указує, що залізо залишається зв'язаним на поверхні пор вуглецевих зерен нестійкими водневими зв'язками через OH^- центри адсорбції.

Висновки

Виявлено, що на поверхні пор ПВМ наявні три стани кислотних груп і три парамагнітні центри неспарених колективізованих електронів, що відповідають різним порам у структурі ПВМ, співвідношення між якими становить 1 : 3 : 6.

Установлено, що вклад парамагнітних центрів неспарених електронів атомів Mn^{2+} та Cr^{3+} у структурі ПВМ складає незначну частку, яка практично не змінюється під час лазерного опромінення. Роль металів зводиться до участі утворення центрів локалізації в процесах генерування колективізованих електронів та зміни їх стану при лазерному опроміненні.

У результаті лазерного опромінення ПВМ, легованого Fe, залізо переходить з двох форм із хромофорами Fe_4O та Fe_6O в три: Fe_5O , $\text{Fe}_5\text{O}'$, Fe_6O , причому нові утворені хромоформи Fe_5O та $\text{Fe}_5\text{O}'$ є нестабільними в часі. У системі ПВМ + Fe в результаті фотокаталітичного окислення фрактальних структур ПВМ утворюється велика кількість сполук із сильно вираженою кислотною функцією.

1. Наноматеріали в пристроях генерування і накопичення енергії / [Б. К. Остафійчук, І. М. Будзуляк, І. І. Григорчак, І. Ф. Миронюк]. – Івано-Франківськ : ВДВ ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2007. – 200 с. – ISBN 978-966-640-216-8.
2. Отримання та модифікація нанопористого вуглецю для молекулярних накопичувачів електричної енергії / [А. П. Шпак, І. М. Будзуляк, Р. П. Лісовський та ін.]. – К. : ІФМ НАН України, 2006. – 82 с. – ISBN 966-360-029-2.
3. Эшворд М. Р. Ф. Титриметрические методы анализа органических соединений / М. Р. Ф. Эшворд. – М. : Химия, 1972. – 496 с.
4. Кравченко О. В. ЭПР спектроскопические характеристики как критерий свойств углеродных материалов растительного происхождения / [О. В. Кравченко, Д. И. Швеиц, В. В. Стрелко, Т. И. Миронюк] // Журнал прикладной химии. – 2002. – Т. 75, № 4. – С. 554–556.
5. Альтушер С. А. Электронный парамагнитный резонанс / С. А. Альтушер, Б. М. Козырев. – 2-е изд. – М. : Наука, 1972. – 672 с.
6. Supercapacitor Module Testing For Energy Storage Devices / [Clark Nancy, Tom Hung, Ganesan Nagasubramanian, Wes Baca] // Proceedings of the 14th International Seminar on [Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices], Deerfield Beach, Florida, USA, 2004. – P. 222–233.
7. Shiraishi S. Preparation and Electric Double Layer Capacitance of Mesoporous Carbon / [Soshi Shiraishi, Kurihara Hideyuki, Oya Asao] // Carbon. – 2001. – Vol. 1, № 3 & 4. – P. 133–137.
8. In Influence of Nitric Acid Treatment of Carbon on the Capacitance Performance of an All Solid State Supercapacitor / [P. Staiti, F. Lufrano, N. Mondello, L. Spadaro] // Proceedings of the 13th International Seminar on [Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices], Deerfield Beach, Florida, USA, 2003. – P. 24–29.

9. Дослідження характеристик електрохімічних конденсаторів, сформованих на основі активованого вуглецю, модифікованого високотемпературною обробкою / [Р. І. Мерена, І. М. Будзуляк, І. І. Григорчак та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 4. – С. 836–839.
10. Модификация свойств активированного углерода, используемого в конденсаторостроении / [И. М. Будзуляк, Р. П. Лисовский, Р. И. Мерена и др.] // Электрохимическая энергетика. – 2005. – Т. 6, № 2. – С. 97–101.
11. Властивості суперконденсаторів на основі активованого вуглецю, інжектваного хромом / [Р. П. Лисовський, І. М. Будзуляк, І. І. Григорчак та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – Т. 5, № 4. – С. 833–835.
12. Рычагов А. Ю. Электрохимические характеристики и свойства поверхности активированных углеродных электродов двойнослойного конденсатора / А. Ю. Рычагов, Н. А. Уриссон, Ю. М. Вольфович // Электрохимия. – 2001. – Т. 37, № 11. – С. 1348–1356.
13. Seisenbaeva G. A. The synthesis of iron (III) ethoxide revisited: Characterization of the metathesis products of iron (III) halides and sodium ethoxide / [Gulaim A. Seisenbaeva, Suresh Gohil, Evgeniya V. Suslova et al.] // Inorganica Chimica Acta. – 2005. – Vol. 358, № 12. – P. 3506–3512.
14. Белозерский Г. Н. Мессбауэровская спектроскопия как метод исследования поверхности / Г. Н. Белозерский. – М. : Энергоиздат, 1990. – 352 с.

EPR and messbauer spectroscopy imposed changes in the behavior of the electron subsystem activated carbon after the laser irradiation. On the developed surface of activated carbon available three states of acid groups that correspond to different pores are shown. Doping of Mn, Cr and Fe leads to the formation of centers of electrons localization of under laser irradiation change their energy state.

Key words: porous carbon material, electronic subsystem, the laser irradiation.

Будзуляк Іван Михайлович – д.ф.-м.н., с.н.с. кафедри матеріалознавства і новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника;

Морушко Ольга Василівна – м.н.с. кафедри матеріалознавства і новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника;

Попович Дмитро Іванович – к.ф.-м.н., с.н.с. Інституту прикладних проблем математики і механіки НАН України;

Яблонь Любов Степанівна – к.ф.-м.н., доцент кафедри теоретичної і експериментальної фізики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.