

## Особливості властивостей наногібридів GaSe(InSe)<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, синтезованих у полі світлової хвилі

Ф.О. Іващишин\*, О.В. Балабан, І.І. Григорчак

Національний університет «Львівська політехніка», вул. Котляревського, 1, 79013 Львів, Україна

(Одержано 01.06.2016, опубліковано 29.11.2016)

У роботі запропоновано новий технологічний підхід до синтезу мультипошарових наноструктур, який забезпечує підсилення їх сенсорних властивостей та можливість застосування для ефективного неелектрохімічного акумулювання електричної енергії. Показано, що поле світлової хвилі, накладене в процесі формування наногібридів, помітно впливає на викликані інкапсуляцією тіосечовини зміни імпедансу, спектру струмів термостимульованої деполяризації (ТСД), тангенса кута електричних втрат ( $\text{tg } \delta$ ) і діелектричної проникності ( $\epsilon$ ). В результаті стало можливим застосування наногібриду GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> як високоефективної структури фотоваріакапу, а також накопичення енергії на квантовому рівні в інфранизькочастотному діапазоні. Крім цього, в ньому виявлено колосальний від'ємний фотоємнісний ефект та появу електрорушійної сили в постійному магнітному полі (ефект «spin battery»).

**Ключові слова:** GaSe, InSe, CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, Інтеркаляція, Імпедансна спектроскопія, Магнітоємнісний ефект, «Spin battery», Квантовий акумулятор.

DOI: 10.21272/jnep.8(4(1)).04015

PACS numbers: 81.07.Pr, 71.20.Tx

### 1. ВСТУП

Проблема енергоощадності, зокрема, в електронній техніці актуалізувала задачу заміни резистивних сенсорів на емнісні. Водночас, розвиток нанотехнологій вимагає інтегрування нановимірних енергетичних блоків у архітектуру наноструктур. Дедалі все очевиднішим є те, що розв'язати зазначені проблеми стандартними підходами неможливо, а тому необхідний докорінний перегляд концептуальних положень. В першу чергу це стосується наноенергетики, де застосування традиційних електрохімічних схем не прийнятно. В цьому разі необхідно формувати наноструктури, які були б придатними для перетворення, накопичення і зберігання електричної енергії не в електрохімічний спосіб, а на квантовому рівні за основної участі електронів і їхніх спінів. Один з можливих шляхів реалізації цього полягає в атомно-молекулярному дизайні гетерофазних наногібридів, які володіють великою міжнанофазною поверхнею розділу і/або забезпечують поєднання колосальних значень діелектричної проникності з низькими (меншими від 1) величинами  $\text{tg } \delta$  особливо в інфранизькочастотному діапазоні. Водночас надання таким структурам ефективної відгукової здатності поляризаційних параметрів на зовнішні фізичні поля дозволило б не тільки створити нові активні елементи сенсорів емнісного типу, але і започаткувати новітні шляхи до створення функціонально-гібридних пристроїв [1, 2].

Відомі методи отримання наногібридизованих структур, такі як вакуумне нанесення, фотолітографія, синтетична техніка Ленгмюра-Блоджетт мають певні застереження, пов'язані з обмеженою варіабельністю у виборі різноманітних гетероінгредієнтів та проблематичністю синтезу конфігурацій «господар-гість». Але саме в останніх системах можна досягати не тільки спрямованої зміни вихідної атомно-

молекулярної структури та силових полів матеріалів-«господарів», синтезу у їхньому внутрікристалічному полі хімічних речовин, але і формувати на атомно-молекулярному рівні певні структури, а в майбутньому і цілі функціональні блоки. Здійснити це можна інтеркаляцією – впровадженням гостей компонентів в кристалоструктурні області дії вандер-ваальсових сил матеріалів-господарів. Саме інтеркаляційні технології покликані створювати задані складні атомно-молекулярні комплекси, користуючись певною послідовністю хімічних реакцій, забезпечуючи одночасно надійну антикоагуляційну матричну ізоляцію наносистем [3]. Досягнення успіху у вирішенні поставленої мети передбачає не тільки розширення відомого класу інтеркалатних гетерофазних комплексів, але і способів їх синтезу, наприклад, в полі світлової хвилі (СП). Власне цьому і присвячена дана робота.

### 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Досліджувані матеріали

В експериментах матеріалами – «господарями» служать шаруваті напівпровідники селеніди галію (GaSe) та індію (InSe), які володіють р- і n-типом провідності, відповідно. Ширина забороненої зони (за оптичними даними) становить 2,02 eV для першого виду монокристалів та 1,22 eV – для другого. Відомо [4], що вони характеризуються наявністю систем так званих «гостьових» позицій, орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі С. Гостьовим контентом слугувала тіосечовина (CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), котра відноситься до класу органічних кавітантів, здатних акомодувати у своїх внутрімолекулярних порожнинах органічні і неорганічні молекули за принципом «замок – ключ» [5, 6].

Формування інтеркалатів InSe(GaSe)<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>

\* [ivan\\_gryg@ukr.net](mailto:ivan_gryg@ukr.net)

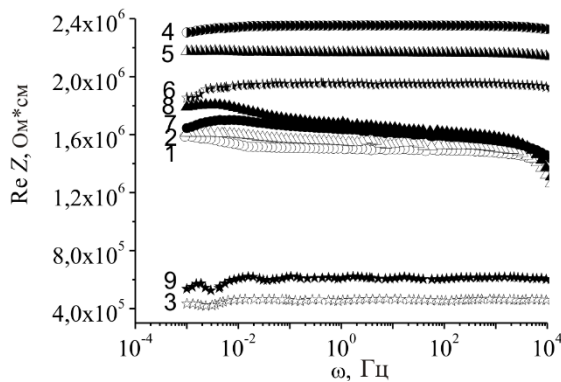
проводилося за схемою тристадійної кристаліноінженерії, детально описаною в [7]. Розширення кристалічної матриці вздовж осі *C* було двократним. Поле світлової хвилі під час формування наноструктури було прикладено перпендикулярно до нанопрошарків. Для цього використано імітатор сонячного випромінювання потужністю 65 Вт з тепловим фільтром. Контрольна група зразків інтеркалювалася за нормальних умов (НУ). Усі вимірювання проводили в напрямку перпендикулярно до шарів монокристалів GaSe, InSe та гібридів на їх основі.

**2.2 Методи досліджень**

Імпедансні дослідження кінетичних і поляризаційних властивостей синтезованих наноструктур проводили в частотному діапазоні  $10^{-3} \div 10^6$  Гц за допомогою вимірювального комплексу "AUTOLAB" фірми "ECO CHEMIE" (Нідерланди), укомплектованого комп'ютерною програмою FRA-2. Комп'ютерна параметрична ідентифікація отриманих імпедансних залежностей проводилася в середовищі програмного пакету ZView 2.3 (Scribner Associates). Струми ТСД реєструвалися в температурному діапазоні  $-30 \text{ }^\circ\text{C} \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$  з постійною швидкістю нагріву  $\sim 1,25 \text{ }^\circ\text{C/хв}$ . Постійне магнітне поле (МП), напруженістю 2,75 кОе, та СП накладалися при вимірюваннях колінеарно зі струмом.

**3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

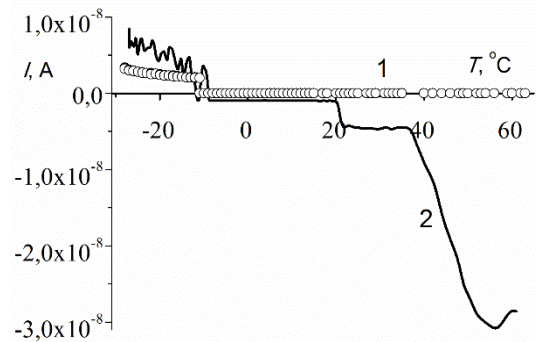
На рис. 1 наведені частотні залежності питомого комплексного імпедансу ( $\text{Re } Z(\omega)$ ), виміряного перпендикулярно до шарів структур до (1-3) і після впровадження тіосечовини за НУ (4-6) та в СП (7-9) у двократно розширений InSe. Насамперед видно, що інкапсуляція тіосечовини призводить до зростання  $\text{Re } Z(\omega)$  при обидвох умовах синтезу. Однак вплив СП, накладеного в процесі формування наногібриду, помітно зменшує зазначений ріст. При цьому, слід зазначити аномальний характер низькочастотної дисперсії реальної складової комплексного імпедансу наногібриду, синтезованого при освітленні, – ріст  $\text{Re } Z(\omega)$  в частотному інтервалі  $10^{-3} \div 10^{-2}$  Гц. Більше того, цікавою є власне немонотонність поведінки  $\text{Re } Z(\omega)$ , яка може



**Рис. 1** – Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу InSe до (1-3) і після впровадження тіосечовини за НУ (4-6) та в СП (7-9). Вимірювання проводилося за НУ (1, 4, 7), у МП (2, 5, 8) та СП (3, 6, 9)

свідчити про «закидання» нерівноважних носіїв в смугу резонансних рівнів, що виникають впровадження гостьових молекул  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  в полі світлової хвилі з подальшим їх вивільненням змінно-струмовим вимірювальним сигналом.

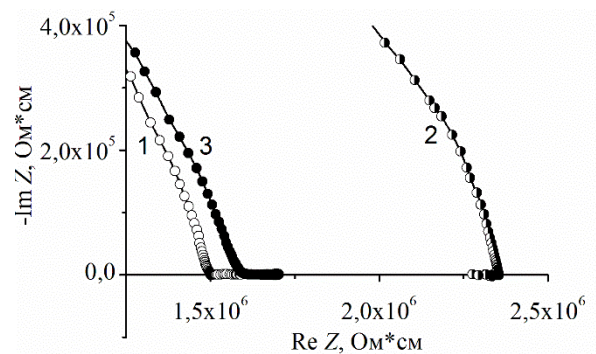
Експериментальним підтвердженням цього є виміряний спектр струмів ТСД (рис. 2) в режимі короткозамкнутих контактів. Видно, що у разі синтезу наноструктури при освітленні спектр ТСД набуває знакозмінного характеру,



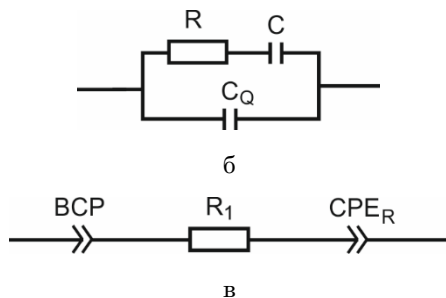
**Рис. 2** – Спектр термостимульованої деполаризації InSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, синтезованого за НУ (1) та в СП (2)

зумовленого появою релаксації гетерозаряду, якраз відповідального за резонансні фотоіндуковані центри прилипання, «зафіксовані» гостьовим контентом.

Накладене при синтезі СП суттєвим чином міняє і низькочастотний генезис годографів імпедансу (рис. 3а). Якщо для наноструктури, синтезованої за НУ можна запропонувати еквівалентну електричну схему, що містить квантову ємність Лурі [8] дискретизованих станів (рис. 3б), то у випадку синтезу в СП вона репрезентується схемою (рис. 3в), в якій елемент ВСР [9] відображає струмопроходження в просторово-обмеженій області з комплексною електропровідністю. При цьому, найнижкочастотніша ділянка (рис. 3а) відображає розподіленість елемента активного опору (зумовлену дискретизацією енергетичного спектру розширеної матриці InSe), що моделюється елементом постійної фази СРЕ [9] з низьким показником фазового відхилення  $\xi < 0,1$ . Зазначимо, що незавершеність дуг годографу імпедансу у високочастотній області (рис. 3а) пов'язана лише з тим, що використовуваний вимірювальний імпедансний комплекс обмежений скануванням частотного діапазону до 1 МГц.



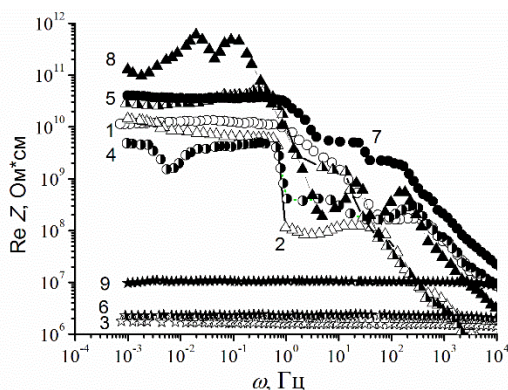
a



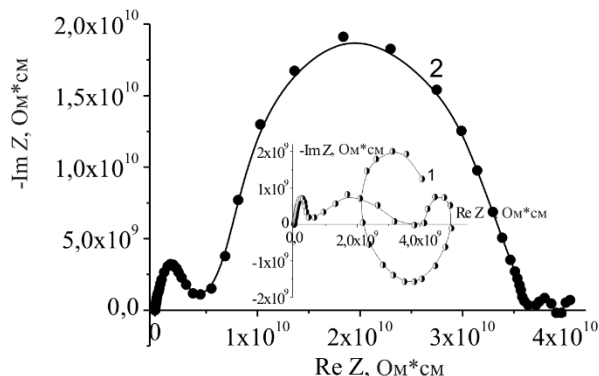
**Рис. 3** – Діаграми Найквіста (а) розширеного InSe (1) та InSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, синтезованого за НУ (2) та в СП (3). Еквівалентні електричні схеми для годографів імпедансу 1 і 3 (б) та 2 (в)

Як видно з рис. 1, накладене в процесі синтезу СП міняє і величину, і характер відгуку наногібридизованої структури на зовнішні фізичні поля. Насамперед, це зміна від'ємного магнетоопору (для зразка, синтезованого за НУ) на додатний та суттєвий ріст фоточутливості. Це дає можливість допустити, що освітлення при формуванні наногібриду InSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> забезпечує інверсію асиметрії густини станів над і під рівнем Фермі, привносячи одночасно нову, високоенергетичну смугу пасткових центрів. Цікаво зазначити, що ці зміни спряжені зі змінами частотних генезисів найнижкочастотніших ділянок годографів імпедансу: відгук на МП пов'язаний з появою розподіленості елемента активного опору, якщо наногібрид синтезований у СП, а освітлення в цьому разі викликає індуктивний відгук – перехід відповідної ділянки у IV- квадрант площини комплексного імпедансу.

Впровадження тіосечовини в еквідистантно розширену матрицю р-типу за НУ на відміну від n-InSe веде до зменшення Re Z(ω) (рис. 4), засвідчуючи електронно-донорні властивості гостьового контенту. Однак, слід відмітити немонотонну поведінку Re Z(ω) в низькочастотному діапазоні. Найімовірніше вона пов'язана з явищем «від'ємної» ємності [10], що виникає в результаті захоплення і утримування інжектованих носіїв пастковими центрами упродовж часу співмірного з півперіодом вимірювального сигналу.



**Рис. 4** – Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу GaSe до (1-3) і після впровадження тіосечовини за НУ (4-6) та в СП (7-9). Вимірювання проводилося за НУ (1, 4, 7), у МП (2, 5, 8) та СП (3, 6, 9)

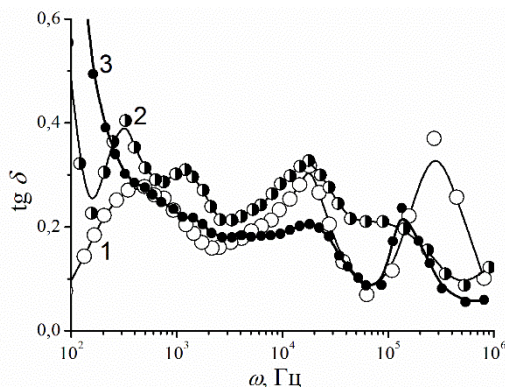


**Рис. 5** – Діаграми Найквіста GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, синтезованого за НУ (1) та в СП (2)

Синтез наноструктури у СП нівелює низькочастотну немонотонність Re Z(ω), що свідчить про відсутність явища «від'ємної» ємності. Яскравим підтвердженням вищесказаного є діаграма Найквіста (рис. 5). Як бачимо, для наногібриду, синтезованого за НУ вітка діаграми Найквіста переходить в IV індуктивний квадрант, чого не спостерігається у структурі, синтезованій у СП. Індуктивна поведінка наноструктури, синтезованої у СП появляється під дією МП, прикладеного під час вимірювання, що корелює із значними деформаціями Re Z(ω) (крива 8, рис. 4).

Синтез наногібриду GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> при освітленні практично не міняє характер частотної залежності ні Re Z(ω), ні залежності -Im Z(ω) = f(Re Z(ω)) в разі відгуку на вимірювання у СП.

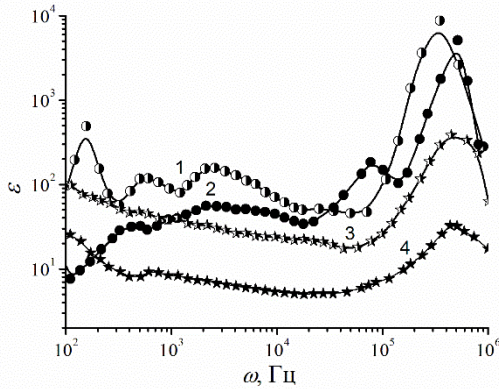
Аналіз поляризаційних властивостей доцільно проводити в частотних областях, де tg δ є меншим від одиниці з огляду на практичну цінність отриманих результатів для Діелектроніки. Як видно з рис. 6, це область 10<sup>2</sup>÷10<sup>6</sup> Гц. Вплив СП при синтезі в означеному ракурсі очевидний – зменшення tg δ при частотах більших від 200 Гц.



**Рис. 6** – Частотні залежності тангенса кута електричних втрат GaSe до (1) та після впровадження тіосечовини за НУ (2) та при СП (3). Вимірювання проводилося за НУ

Діелектрична проникність в частотному інтервалі 10<sup>3</sup>÷10<sup>5</sup> Гц (рис. 7) слабо міняється після впровадження CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> у GaSe за НУ. При синтезі даної структури у СП ε приймає менші значення практично у всьому частотному інтервалі 10<sup>2</sup>÷10<sup>6</sup> Гц порівняно з розширеною кристалічною матрицею GaSe. При частоті 100 Гц цей спад складає два порядки.

Інтегральне світло при синтезі GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> призводить до зменшення і магнітоємнісного ефекту.

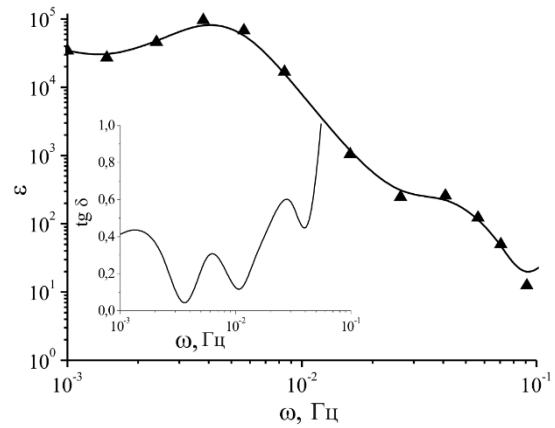


**Рис. 7** – Частотні залежності дійсної складової діелектричної проникності GaSe після впровадження тіосечовини за НУ (1) та при СП (2). Вимірювання проводилося за НУ (1, 2) і при СП (3, 4)

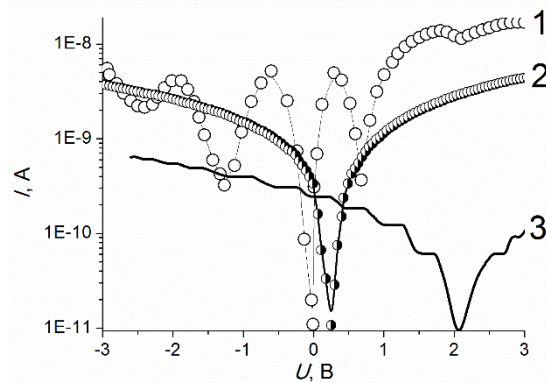
Проте для синтезованих структур виявлено колосальний від'ємний фотодіелектричний ефект: при освітленні діелектрична проникність сильно зменшується. В частотному інтервалі  $10^3 \div 10^6$  Гц таке зменшення сягає більш як 4-кратного значення (рис. 7). Як видно, накладене СП при синтезі (в зазначеному частотному інтервалі) майже втричі підсилює цей ефект. А в частотному діапазоні  $2 \cdot 10^5 \div 10^6$  Гц відношення  $\epsilon_{\text{темрява}} / \epsilon_{\text{освітлення}} \approx 150$ . Враховуючи, що  $\text{tg } \delta$  за даних умов є суттєво меншим від 1, приходимо до висновку, що СП (під час синтезу) забезпечує можливість застосування наногібриду GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> як високоефективної структури фотодіодів. При цьому, наявні інтервали аномальної частотної дисперсії (ріст  $\epsilon$  зі збільшенням частоти) мають електронне походження і, найімовірніше, пов'язані з додатковою поляризацією, що виникає при перескоках носіїв по локалізованих станах під рівнем Фермі.

Власне накладання СП в процесі синтезу наногібридів GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> забезпечує також і поєднання меншого від одиниці значення  $\text{tg } \delta$  у інфранизькочастотному діапазоні з надвисоким значенням діелектричної проникності (рис. 8), що робить можливим накопичення енергії на квантовому рівні у таких матеріалах. Можна припустити, що природа цього ефекту пов'язана з накопиченням зарядів на межі фаз матеріал/тіосечовина при умові інтерференційної блокади резонансного електронного тунелювання і великого радіуса екранування Томаса-Фермі підбар'єрних носіїв. Більше того, накладання МП, перпендикулярно до шарів наноструктури GaSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, синтезованої при СП, викликає появу електрорушійної сили, величина якої за НУ сягає, як видно з рис. 9, більше 2 В.

Природа виявленого магнітогальванічного ефекту поки що до кінця не з'ясована. Наразі є дві гіпотези. Одна з них пов'язана з відомим в літературі ефектом «spin battery», а друга передбачає підсилення термогальванічного ефекту (крива 2 на рис. 9) магнітним полем за рахунок зееманівського модифікування енергетичного спектру. Зазначений термогальванічний ефект (при вимірюванні за НУ) візуалізував



**Рис. 8** – Частотні залежності  $\epsilon''$  і  $\text{tg } \delta$  у GaSe після впровадження тіосечовини в СП. Вимірювання проводилося у МП



**Рис. 9** – Вольтамперні характеристики GaSe до (1) та після впровадження тіосечовини у СП (2, 3). Вимірювання проводилося за НУ (2) та у МП (3)

величину 0,24 В, природу якого найлогічніше віднести до релаксації фотоелектретної поляризації.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Поле світлової хвилі, накладене в процесі формування InSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>>, надає немонотонного характеру  $\text{Re } Z(\omega)$  синтезованого наногібриду у низькочастотній області та зумовлює появу релаксації гетерозаряду за НУ.

2. Синтез InSe<CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>> при освітленні міняє від'ємний магнетоопір (для зразка, синтезованого за НУ) на додатний та спричиняє суттєвий ріст фоточутливості. Ці зміни спряжені зі змінами частотних генезисів найнизькочастотніших ділянок годографів імпедансу: відгук на МП пов'язаний з появою розподіленості елемента активного опору, якщо наногібрид синтезований у СП, а освітлення в цьому разі викликає індуктивний відгук.

3. Для наногібриду, синтезованого за НУ спостерігається ефект «від'ємної ємності», що може бути зумовлений захопленням і утримуванням інжектованих носіїв пастковими центрами упродовж часу співмірного з півперіодом вимірювального сигналу. Однак цього не спостерігається для структури, синтезованої у СП. Індуктивна поведінка наноструктури, синтезованої у СП появляється під дією МП, прикладеного під час вимірювання.

4. Накладене при синтезі освітлення втричі підсилює від'ємний фотодіелектричний ефект при частотах  $10^3 \div 10^6$  Гц. А в частотному діапазоні  $2 \cdot 10^5 \div 10^6$  Гц відношення  $\epsilon_{\text{темрява}}/\epsilon_{\text{освітлення}} \approx 150$ . Враховуючи, що  $\text{tg } \delta \ll 1$ , приходимо до висновку, що СП під час синтезу забезпечує можливість застосування наногібриду  $\text{GaSe}<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$  як високоефективної структури фотоварикапів.

5. У інфранизкочастотній області поєднання

$\text{tg } \delta < 1$  з надвисоким значенням  $\epsilon$  досягається тільки в результаті накладання при синтезі наногібризованої структури  $\text{GaSe}<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$  інтегрального світла, що робить можливим надвисокоемне накопичення електричної енергії на квантовому рівні. Водночас, накладання МП, напруженість 2,75 кОе, викликає появу електрорушійної сили, величина якої за кімнатних температур сягає 2 В.

## Особенности свойств наногибридов $\text{GaSe}(\text{InSe})<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$ , синтезированных в поле световой волны

Ф.О. Иващишин, О.В Балабан, И.И. Григорчак

Национальный университет "Львовская политехника", ул. Котляревського, 1, 79013 Львов, Украина

В работе предложен новый технологический подход к синтезу мультислойных наноструктур, который обеспечивает усиление их сенсорных свойств и возможность применения для эффективного неэлектрохимического аккумулирования электрической энергии. Показано, что освещение, наложенное в процессе формирования наногибридов, заметно влияет на вызванные инкапсуляцией тиомочевины изменения импеданса, спектра токов термостимулированной деполяризации (ТСД), тангенса угла электрических потерь  $\text{tg } \delta$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . В результате стало возможным применение наногибридов  $\text{GaSe}<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$  как высокоэффективных структур фотоварикапов, а также накопление энергии на квантовом уровне в инфранизкочастотном диапазоне. Кроме этого, в нем обнаружено колоссальный отрицательный фотоемкостный эффект и появление ЭДС в постоянном магнитном поле (эффект «spin battery»).

**Ключевые слова:** GaSe, InSe,  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ , Интеркаляция, Импедансная спектроскопия, Магнитноемкостный Эффект, «Spin battery», Квантовый аккумулятор.

## Peculiarities of Properties of the $\text{GaSe}(\text{InSe})<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$ Nanohybrids, Synthesized under Lighting

F.O. Ivashchyshyn, O.V. Balaban, I.I. Grygorchak,

Lviv Polytechnic National University, 1, Kotlyarevskiy st., 79013 Lviv, Ukraine

In this paper, new technological approach to the synthesis of multilayered nanostructures was proposed. It increased sensory properties of these nanostructures and their application for highly efficient nonelectrochemical accumulation of electrical energy. In particular, it was shown, that the field of the light wave, imposed in the process of nanohybrid formation, significantly affected the changes, caused by encapsulation of thiourea, on impedance, spectrum of thermally stimulated depolarisation currents (TSD), loss tangent  $\text{tg } \delta$  and dielectric constant  $\epsilon$ . As a result, both the application of nanohybrids  $\text{GaSe}<\text{CS}(\text{NH}_2)_2>$  as highly effective photovaricap structures and accumulation of energy on the quantum level at infralowfrequency range were investigated. In addition, a huge negative photo-capacitive phenomenon and the appearance of electromotive force in a constant magnetic field («spin battery» phenomenon) in nanohybrids were found.

**Keywords:** GaSe, InSe,  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$ , Intercalation, Impedance spectroscopy, Magnetic-capacitive phenomenon, «Spin battery», Quantum battery.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Н.Т. Покладок, І.І. Григорчак, О.І. Григорчак, Ф.О. Иващишин, П.Й. Стахіра, *SEMST* 1, 69 (2010) (N.T. Prokladok, I.I. Gryhorchak, O.I. Grygorchak, F.O. Ivashchyshyn, P.Y. Stakhira, *SEMST* 1, 69 (2010)).
2. Т.М. Біщанюк, О.В. Балабан, І.І. Григорчак, А.В. Фечан, *ФІП* 11, 91 (2013) (Т.М. Bishchanyuk, O.V. Balaban, I.I. Gryhorchak, A.V. Fechan, *FIP* 11, 91 (2013)).
3. І.І. Grygorchak, B.O. Seredyuk, K.D. Tovstyuk, B.P. Bakhmatyuk, *High frequency capacitor nanostructure formation by intercalation* (Paris: Kluwer acad. Publ.: 2002).
4. S.A. Voitovych, I.I. Grygorchak, O.I. Aksimentyeva, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 497, 55 (2008).
5. Ж.-М. Лен, *Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы* (Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН:1998) (Zh.-M. Len, *Supramolekulyarnaya khimiya. Kontseptsyy u perspektivy* (Novosybyrsk: Nauka.

- Sybyrskoe predpruyatye RAN:1998)).
6. Д.В. Стид, Д.Л. Этвуд, *Супрамолекулярная химия. В двух томах* (М.: Академкнига: 2007) (D.V. Stid, D.L. Etvud, *Supramolekulyarnaya khimiya. V dvukh tomakh* (M.: Akademkniga: 2007)).
  7. I. Grygorchak, F. Ivashchyshyn, P. Stakhira, R.R. Reghu, V. Cherpak, J.V. Grazulevicius. *JNO* **8**, 1 (2013).
  8. S. Luryi, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 501 (1988).
  9. З.Б. Стойнов, Б.М. Графов, Б.С. Саввова-Стойнова, В.В. Елкин, *Электрохимический импеданс* (М.: Наука: 1991) (Z.B. Stoynov, B.M. Grafov, B.S. Savvova-Stoynova, V.V. Yelkin, *Elektrokhimicheskiy impedans* (M.: Nauka: 1991)).
  10. I.I. Grygorchak, B.A. Lukiyanets, O.V. Balaban, T.M. Bishchaniuk, R.Ya. Shvets, *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **26**, 690 (2014).