

PACS numbers: 42.70.Jk, 61.46.Bc, 68.37.Lp, 78.40.-q, 78.67.Sc, 81.07.Pr, 81.15.Gh

## **Осадження сполук карбазолу з газової фази: молекулярні розчини з органічними акцепторами, нанокompозити з неорганічними напівпровідниками та золотом, гетероструктури**

М. Ю. Барабаш, Д. О. Гринько\*

*Технічний центр НАН України,  
вул. Покровська, 13,  
04070 Київ, Україна*

*\*Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
просп. Науки, 41,  
03650, МСП, Київ-39, Україна*

Досліджено плівки на основі Poly(*N*-vinylcarbazole) (PVCa), виготовлені осадженням з газової фази, доповані акцепторними органічними та неорганічними напівпровідниковими сполуками і золотом. Газофазна технологія легування PVCa акцепторними сполуками, зокрема, C<sub>60</sub>, TNF, CdSe спричиняє формування ефективних фотопровідників. Комбінування PVCa в тонкоплівковій гетероструктурі з акцепторами, неорганічними напівпровідниками та металами робить ці матеріали привабливими багатофункціональними системами для оптоелектроніки, електрофотографії, молекулярної фотоніки, сенсорики та темплатних технологій. Показано ефективність розробленої автоматизованої системи контролю одночасної газофазної конденсації з кількох джерел для виготовлення гетероструктур і темплатних технологій.

Films based on Poly(*N*-vinylcarbazole) (PVCa), fabricated by deposition from the gas phase and doped with acceptor organic and inorganic semiconducting compounds and gold, are investigated. Gas-phase doping technology of PVCa with acceptor compounds, in particular, C<sub>60</sub>, TNF, CdSe, results in formation of efficient photoconductors. The combining of PVCa and thin-film heterostructures with acceptors, inorganic semiconductors, and metals makes these materials attractive multifunctional systems for optoelectronics, electrophotography, molecular photonics, sensing, and templating technologies. The efficiency of the developed automated control system of simultaneous gas-phase condensation from several sources for fabrication of heterostructures and templating technologies is demonstrated.

Исследованы плёнки на основе Poly(*N*-vinylcarbazole) (PVCa), изготовленные осаждением из газовой фазы, допированные акцепторными орга-

ническими и неорганическими полупроводниковыми соединениями и золотом. Газофазная технология легирования PVCa акцепторными соединениями, в частности, C<sub>60</sub>, TNF, CdSe приводит к формированию эффективных фотопроводников. Комбинирование PVCa в тонкоплёночные гетероструктуры с акцепторами, неорганическими полупроводниками и металлами делает эти материалы привлекательными многофункциональными системами для оптоэлектроники, электрофотографии, молекулярной фотоники, сенсорики и темплатных технологий. Показана эффективность разработанной автоматизированной системы контроля одновременной газофазной конденсации из нескольких источников для изготовления гетероструктур и темплатных технологий.

**Ключові слова:** хемічне осадження з газової фази, плівка, молекулярний напівпровідник, фотопровідник, карбазол, донор, акцептор, нанокластер, гетероструктура, молекулярна фотоніка, оптоелектроніка, сенсор, темплат, самоорганізація.

*(Отримано 18 листопада 2010 р.; після доопрацювання — 9 грудня 2011 р.)*

## 1. ВСТУП

Розвиток фотоніки, оптоелектроніки та сенсорики вимагають створення нових матеріалів та метод організації їх структури та взаємодій в нанометровому масштабі. Процеси самоорганізації молекулярних сполук під час формування молекулярно координованих комплексів мають вирішальне значення для синтезу фотопровідних, електрофотографічних матеріалів, сонячних перетворювачів [1–3] та моделювання живих систем.

Темплати є одним з видів технологічних інструментів для цілеспрямованого керування процесами самоорганізації. Темплатом є функціонально організований в просторі мікроінструмент для спрямування в просторі та часі фізико-хімічних процесів самоорганізації наноб'єктів на його поверхні за рахунок близькопольової взаємодії [4, 5]. Сильне, просторово організоване електростатичне поле темплату впливає на процеси кінетичного та дифузійного транспорту речовини, сорбції, зародкування, фазоутворення, хімічні реакції, транспорт заряджених носіїв заряду та симетрію процесів.

Ефективним та технологічно привабливим способом виготовлення електростатичних темплатів є електрофотографічна метода [6, 7] а середовищем для формування полів заданої топології є плівки на основі Poly(*N*-vinylcarbazole (PVCa), доповані акцепторними органічними та неорганічними напівпровідниковими сполуками та золотом, що виготовлені осадженням з газової фази.

PVCa є високоефективним фотопровідним полімером, який широко використовується в електрофотографії, зокрема, в технології сучасних лазерних принтерів. Переважну більшість даних щодо чу-

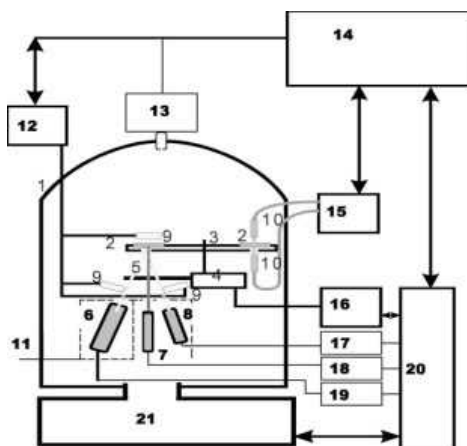
тливих до структурно-хімічної будови властивостей молекулярних фотопровідних напівпровідників одержано на плівках, виготовлених синтезою з розчинів [3, 8, 9]. Газофазні методи виготовлення тонкоплівкових електрофотографічних реєстрівних середовищ у порівнянні з рідинними дозволяють використати інші чинники для молекулярної організації таких наноконкомпозитів та інші технологічні фактори впливу на властивості таких матеріалів [8, 10]. Газофазне осадження надає технологічний інструмент для формування чітких меж у гетероструктурах та для створення об'ємних гетеропереходів з вбудованим локальним полем, які можуть бути використані, наприклад, для синтезу сонячних перетворювачів [11] та в сенсориці [12]. Комбінація провідних властивостей PVCa з іншими матеріалами робить їх привабливими багатофункціональними системами з великими можливостями [3, 13–23], що можуть бути використані для електрофотографії як сенсори та в темплатних технологіях [6].

У даній роботі досліджуються плівки, виготовлені на основі Poly(*N*-vinylcarbazole (PVCa), допованого акцепторними органічними та неорганічними напівпровідниковими сполуками та золотом у газофазних процесах. Передбачається, що допування PVCa донорно-акцепторними сполуками, зокрема, CdSe спричиняє збільшення значень фотоіндукованого заряду.

## 2. МЕТОДИКА ГАЗОФАЗНОЇ СИНТЕЗИ КОМПЗИТИВ PVCa

Плівки наноконкомпозитів було одержано шляхом переведення в газову фазу у вакуумі з декількох джерел і спільного осадження компонент. Компоненти плівок PVCa осаджували шляхом часткового термічного розкладання у вакуумі порошку полімера PVCa (сер. мол. маса 10 000), переносу продуктів у молекулярному жмуті на віддаль 15 см та конденсації на підложжі. В окремих експериментах додаткове осадження плівок супроводжувалось впливом на пари електронного жмута енергією 0,7–1 кеВ густиною струму 1–3 мА/см<sup>2</sup>.

Акцептори CdSe, фуллерен C<sub>60</sub> та тринітрофлуоренон (TNF) сублимували з вольфрамового випарника безпосереднього розжарювання у вакуумі. Тиск залишкових газів становив 3·10<sup>-2</sup> Па. Випаровування більшості полярних органічних молекулярних сполук супроводжується поляризацією органічного напівпровідника. У локальних електричних полях, що виникають в результаті поляризації, робота виходу полярних молекул може змінюватися в досить широких межах. Це призводить до нестабільного молекулярного жмута при сталій температурі сублиматора, що створює проблеми для одержання багатокомпонентних композитів заданого складу [24]. Тому для відтворюваності плівок із заданим розподілом компонент за товщиною плівки та гетероструктур було використано систему автоматичного регулювання процесу вирощування плівок.

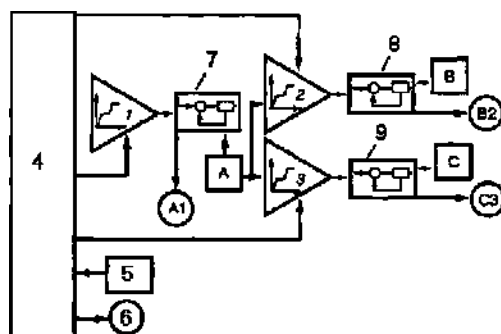


**Рис. 1.** Схема устави на базі ВУП-5 для нанесення багатокомпонентних плівок, нанокompatитів та гетероструктур осадженням з газової фази: 1 — вакуумна камера; 2 — підложжя; 3 — система транспортування підложжя з повідною; 4, 5 — рухомі екрани; 6, 7, 8 — випарники; 9 — резонаторні кварцові давачі; 10 — світловоди; 11 — теплові екрани випарників; 12 — контролер кварцових давачів; 13 — давач тиску йонізаційного типу; 14 — АЦП, ЦАП; 15 — дифракційний мініспектрометр; 16 — контролер системи транспортування; 17, 18, 19 — контролери випарників; 20 — керувальний комп'ютер; 21 — система відсмокування устави ВУП-5 [6].

**Контроль процесів синтезу.** Вирощування плівок виконували за допомогою модифікованої вакуумної устави ВУП-5 (Україна) під управлінням оригінальної комп'ютеризованої системи керування. На рисунку 1 наведено схему устави для нанесення багатокомпонентних плівок, нанокompatитів та гетероструктур осадженням з газової фази. Функціональну схему керування технологічним процесом осадження з кількох джерел наведено на рис. 2.

Сигнали резонаторних кварцових давачів-свідків маси, що випарувались, кожної з компонент плівки використовувались для керування їх молекулярними потоками в реальному масштабі часу. Чутливість кварцових давачів становила  $6 \cdot 10^{-8}$  кг/м<sup>2</sup>, програмно контрольований дрейф частоти не перевищував 10 Гц/год. Для переміщення підкладок у камері, в процесі вирощування використовувався програмно-керований маніпулятор планетарного типу. Експозиція підкладок у жмутах сублимованих молекул та вільних радикалів здійснювалася за допомогою керованих заслінок. Спектрофотометер на основі фотодіодної лінійки та дифракційної ґратниці дозволяє реєструвати спектри вбирання плівок безпосередньо в процесі росту, а також досліджувати та контролювати процеси хемічної взаємодії, агрегації та адсорбції в композитах.

Необхідний профіль концентрації компонент за товщиною плів-



**Рис. 2.** Функціональна схема апаратно-програмних засобів для регулювання складу багатокомпонентних нанокompозитних плівок з органічною і неорганічною компонентами спільним осадженням з газової фази: А, В, С — резонаторні кварцові давачі контролю маси відповідних компонентів плівки; 1 — програмний модуль задання кінетики росту компоненти А; 2, 3 — програмні модулі задання розподілу концентрації відповідно компонент В і С за товщиною плівки; А1, В2, С3 — випарники відповідно компонент А, В, С, 4 — модуль контролю; 5 — спектрофотометер; 6 — рухомі екрани; 7, 8, 9 — програмні пропорційно-інтегровальні-диференціальні регулятори.

ки композита та кінетика росту задавалися як цільові функції. Програмування комплексу виконано мовою LabVIEW.

Використання резонаторних кварцових давачів-свідків маси для точного керування інтенсивністю молекулярних жмутів потребує врахування коефіцієнтів прилипання молекул кожної з компонент та їхньої температурної залежності [25], якщо є потреба, визначаються в окремих технологічних експериментах.

### 3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ФОРМ КАРБАЗОЛУ ЗА ІНФРАЧЕРВОНИМИ СПЕКТРАМИ

Щоб дослідити особливості будови одержаних осадженням з газової фази плівок, були виміряні ІЧ спектри плівок, які містять карбазол та порошки Poly(*N*-vinylcarbazole) і Mono(*N*-vinylcarbazole) [26]. Речовини наносилися на підкладки з кремнію марки КДБ, покриті плівкою золота товщиною близько 20 нм, термічно напорошеного у вакуумі. Плівки PVCa товщиною близько 300 нм одержували з газової фази шляхом часткового термічного розкладання у вакуумі порошку полімера PVCa (сер. мол. маса 10 000), переносу продуктів у молекулярному жмуті в камері і конденсації на підкладці (позначені TPVCa). Додатково було виготовлено плівки PVCa, процес осадження яких супроводжувався додатковим впливом на пари електронним жмутом (позначено IPVCa). Одержані з газової фази у ваку-

умі плівки, що містять карбазол, порівнювали з осадами з вихідного PVCa (позначено PVCa) і Mono(*N*-vinylcarbazole) (позначено MNVCa), нанесеними у вигляді тонкоподрібненого порошку на ті ж підкладки в звичайних умовах.

Вимірювання спектрів вбирання робили у відбитому від підкладок з об'єктом жмута у проточній кюветі в атмосфері осушеного азоту. Спектри реєструвалися в діапазоні  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  з часом нагромадження  $30\text{--}60\text{ с}$ .

Спектри вбирання в діапазонах  $2700\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  і  $1700\text{--}500\text{ см}^{-1}$  наведено на рис. 3, а, б.

У спектрах всіх об'єктів можна виділити [27–30] характеристичну для карбазолу область  $650\text{--}1650\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, а, б) з інтенсивними коливаннями (коливання К)  $722\text{ см}^{-1}$  (деформаційні коливання ароматичного кільця),  $1220\text{ см}^{-1}$  (пласкі коливання груп СН ароматичного кільця),  $1230\text{ см}^{-1}$  (СN-коливання),  $1450\text{ см}^{-1}$  (несиметричні коливання карбазолу).

У спектрах також є смуги середньої інтенсивності  $744, 700\text{--}750, 2900\text{--}3000\text{ см}^{-1}$  (група А1), які можна віднести до коливань СН-груп вуглеводнів алканового ряду,  $530\text{--}640\text{ см}^{-1}$  (коливання V (коливання олефінових і вінілових груп) і  $3390\text{--}3180\text{ см}^{-1}, 1480\text{--}1580\text{ см}^{-1}, 1300\text{--}1350\text{ см}^{-1}$  (коливання N (коливання NH-груп у різному валентному оточенні)).

Колівання в плівках TPVCa і IPVCa  $530\text{--}640\text{ см}^{-1}$  відсутні, тоді як вони яскраво виявляються в зразку MNVCa і слабкіше в PVCa, що свідчить про наявність вінілових груп. Смуги  $850\text{--}1074\text{ см}^{-1}$  (коливання А2) 3–3'-коливання олефінових груп) слабо виявляються в TPVCa і мають відносно високу інтенсивність для MNVCa.

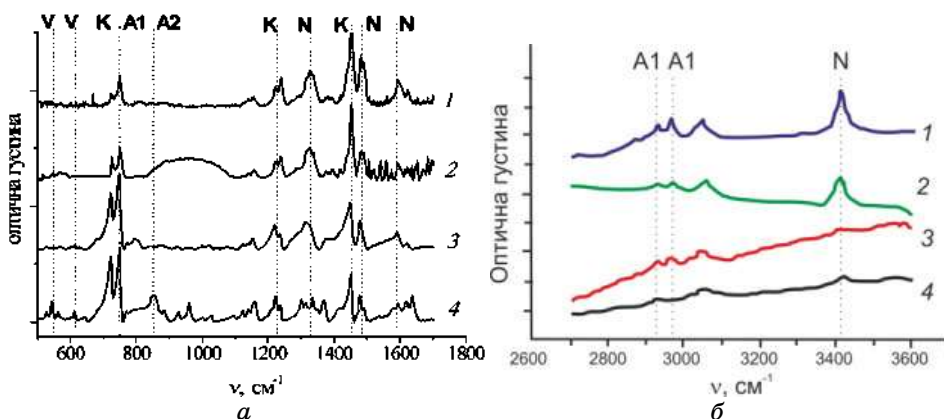


Рис. 3. а — спектри вбирання в діапазоні  $1700\text{--}500\text{ см}^{-1}$ : 1 — TPVCa, 2 — IPVCa, 3 — PVCa, 4 — MNVCa; б — спектри вбирання в діапазоні  $2700\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ : 1 — TPVCa, 2 — IPVCa, 3 — PVCa, 4 — MNVCa.

**ТАБЛИЦЯ.** Відносна інтенсивність смуг, нормованих на інтенсивність смуг групи карбазолів (К) для кожної плівки.

Група коливань	PVCa	MNVCa	TPVCa	IPVCa
К (карбазоли)	1	1	1	1
V (вініли)	0,044	0,375	0	0
A1 + A2 (алкіли)	1,06	1,362	1,37	1,56
N (NH- та NH <sub>2</sub> -групи)	0,746	0,48	3,6	2,75

Інтенсивність коливань *N* мінімальна в PVCa. В області несиметричних коливань ароматичних груп (850–950 см<sup>-1</sup>, 1095 см<sup>-1</sup>, 1369 см<sup>-1</sup>, 1599–1700 см<sup>-1</sup>) є відмінності в спектрах MNVCa і PVCa, що свідчать про значно більше демпфювання таких коливань, так само і в плівках TPVCa і IPVCa.

Відносна інтенсивність смуг, нормованих на інтенсивність смуг групи К, наведено в табл., дозволяє зіставити молярну частку різних структурно-хімічних фрагментів щодо карбазолу. Таким чином:

— вінілові групи присутні як в MNVCa, так і в невеликій концентрації в PVCa, і відсутні в продуктах газозафазного осадження;

— несиметричні коливання карбазольних ядер у більшому ступені виявляються в MNVCa, що свідчить про більшу взаємодію карбазольних груп у твердотільних PVCa і плівках TPVCa, IPVCa, що призводить до демпфювання;

— відносна інтенсивність коливань полімерного каркаса на основі алканів свідчить про дещо меншу олігомерність продукту газозафазного осадження TPVCa порівняно з IPVCa і PVCa;

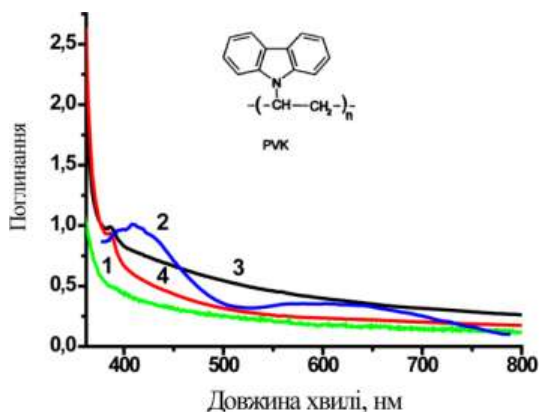
— у вихідному PVCa концентрація груп NH та NH<sub>2</sub> незначна і помітно більша в продуктах TPVCa, IPVCa.

Отже, в результаті газозафазного осадження олігомерність продуктів карбазолу зменшується, а в твердотільних осадах нагромаджуються продукти часткового розкладу карбазолу, що містять групи NH та NH<sub>2</sub>. Ці процеси більш яскраво виявляються в результаті опромінення електронним променем з енергією 0,7–1 кеВ густиною струму 1–3 мА/см<sup>2</sup>.

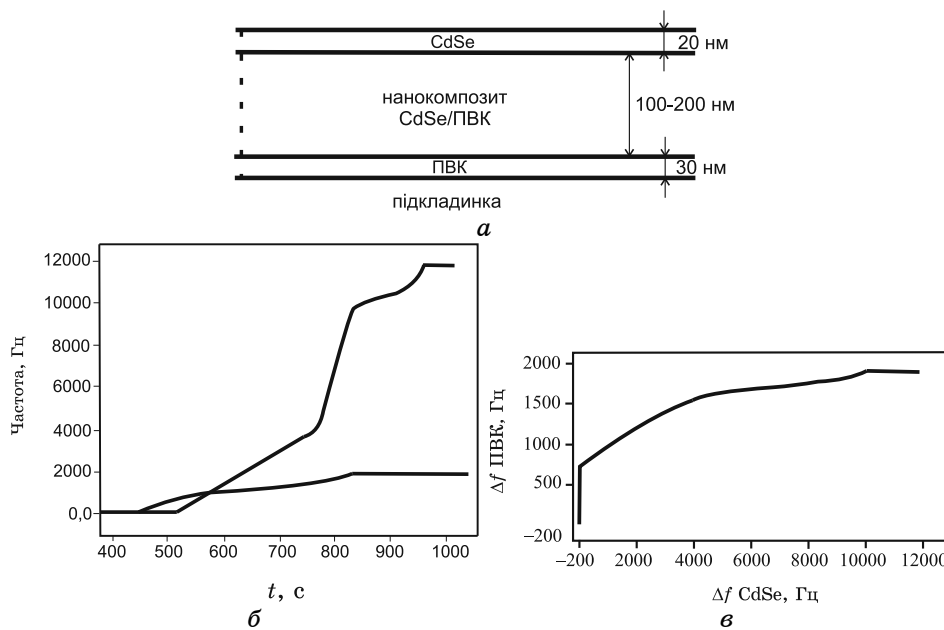
#### 4. МОЛЕКУЛЯРНІ РОЗЧИНИ ТА КОМПОЗИТИ PVCa ІЗ СИЛЬНИМИ АКЦЕПТОРАМИ

Одержано плівки наноконкомпозитів із сильними акцепторами фуллереном C<sub>60</sub> та тринітрофлуореноном. У спектрах вбирання наноконкомпозитів рис. 5 присутні смуги вбирання, які можуть бути віднесені до комплексів з переносом заряду. Формування КПЗ у композитах PVCa/C<sub>60</sub> також спостерігалось нами у [31] як результат неадитивності спектрів люмінесценції окремих компонент.

Більша ширина смуг КПЗ в композитах рис. 4 у порівнянні з плі-



**Рис. 4.** Спектри вбирання нанокompозитів PVCa з акцепторами: 1 — PVCa, 2 — композит PVCa/CdSe 15% мас., 3 — композит PVCa/C<sub>60</sub> 11% мас., 4 — композит PVCa/TNF 15% мас.



**Рис. 5.** Схема гетероструктури плівки на основі нанокompозита CdSe/PVCa (a); б — зміна частоти кварцових давачів маси в процесі вирощування гетероструктури CdSe/PVCa: 1 — CdSe, 2 — PVCa; в — параметрична залежність частоти резонаторних кварцових давачів, пропорційної масі двох компонент у процесі вирощування гетероструктури CdSe/PVCa.



вками, одержаними з розчинів [3, 6, 8, 9] може бути пов'язана з більшим розупорядкуванням плівок та відповідно більшим розкидом значень енергії Кулонової взаємодії поляризованих станів молекулярного композита з екранівним оточенням.

## 5. ВИГОТОВЛЕННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ PVCa

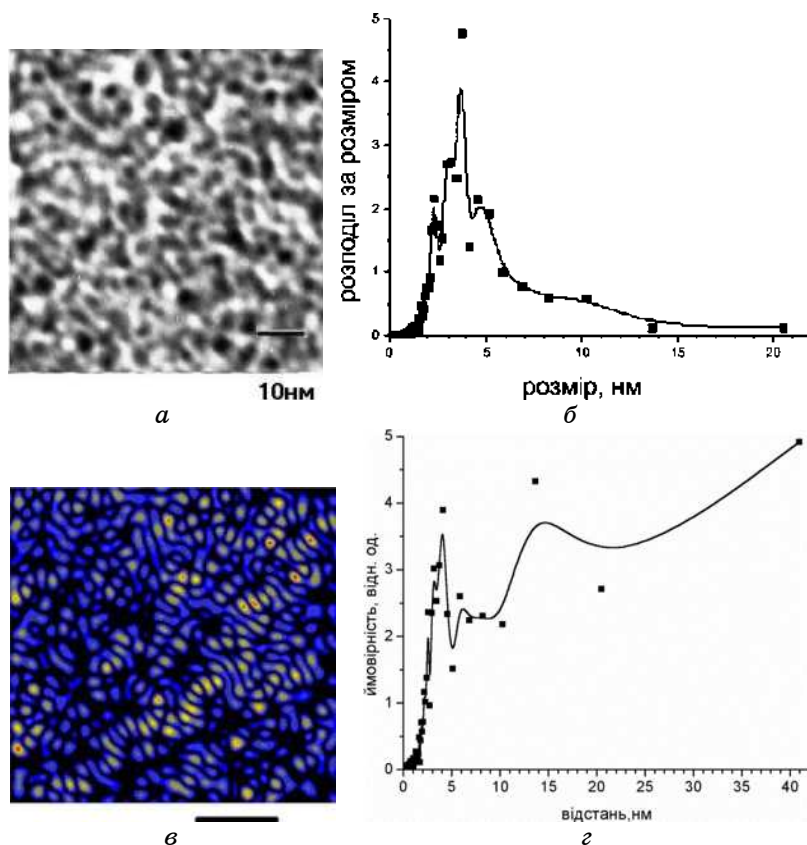
Плівки гетероструктури CdSe/PVCa одержували одночасним осадженням у вакуумі, шляхом термічного випаровування, з двох джерел методом пошарового нашарування на підкладках, що рухалися обертально. При напорошенні використовувались різні типи підкладок: скляні, ITO, Si, KBr та скляні з шаром золота.

Схему гетероструктури CdSe–PVCa і структуру плівки нанокompозита CdSe/PVCa наведено на рис 5. Гетероструктура CdSe/PVCa складається з декількох шарів. Часова залежність процесу вирощування нанокompозита CdSe/PVCa контролювалася програмно. Спочатку вирощували шар PVCa, потім відбувалося одночасне осадження CdSe і PVCa. При  $t = 770$  с швидкість випаровування CdSe була збільшена для того, щоб створити градієнтну структуру CdSe/PVCa. Потім випаровування PVCa було припинено і структура була закрита зверху тонким шаром CdSe. Таким чином виготовлено об'ємний гетероперехід CdSe/PVCa.

## 6. КОМПОЗИТИ PVCa ІЗ ЗОЛОТОМ

Плівки нанокompозитів Au/PVCa виготовляли одночасною конденсацією з газової фази. Золото випаровували терморезистивною методом з танталового човника. Підготову зразків для дослідження методом просвітньої електронної мікроскопії виконували шляхом конденсації нанокompозита на свідки з кристалів KBr з наступним відшаруванням вільної плівки у водному розчині за стандартною методикою [32]. Нанокластерну структуру композитної плівки Au/PVCa 24% мас. металу, товщиною біля 40 нм, досліджено методом просвітньої електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа JEM-1230 (фірма JEOL, Японія) з роздільною здатністю 0,5 нм, представлено на рис. 6, а.

Нанокластери мають форму, близьку до сферичної з розміром середньостатистичного нанокластера золота біля 5 нм. Розподіл золотих нанокластерів за розмірами рис. 6, б, топологію просторового розташування агрегатів із золотих нанокластерів (рис. 6, в) та функцію розподілу відстаней в цих агрегатах (рис. 6, г) визначали за допомогою чисельної Фур'є та кореляційної аналіз фрагментів вихідного зображення [31, 33, 34]. Розподіл золотих нанокластерів за розмірами має поріг біля 2 нм, що добре відповідає розміру критич-



**Рис. 6.** Нанокластерна структура композитної плівки Au/PVCA 24% мас. металу: *a* — просвітня електронна мікроскопія; *б* — розподіл золотих нанокластерів за розмірами; *в* — топологія просторового розташування агрегатів із золотих нанокластерів (колір передає кількість нанокластерів в агрегаті); *г* — функція розподілу відстаней в цих агрегатах.

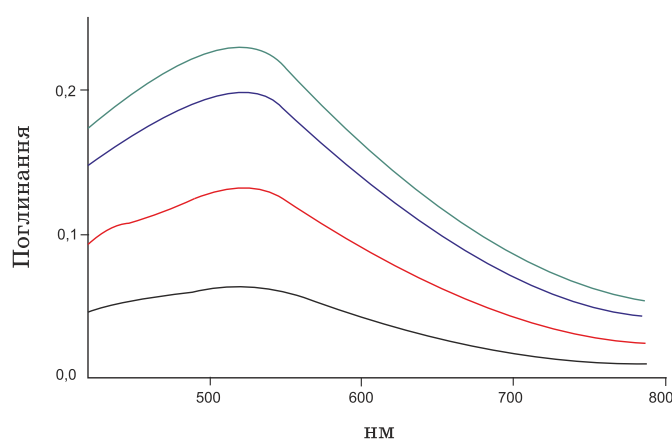
ного зародка золота, що утворюється в полімерній матриці за механізмом пар–рідина–кристал [35].

Аналіза розподілу оптичної густини на ТЕМ-зображеннях свідчить про те, що агрегація золотих нанокластерів є суттєвою особливістю композитної плівки Au/PVCA. Віддаль між нанокластерами в агрегатах знаходиться в інтервалі 2–5 нм з найімовірнішим значенням 4 нм, тобто менше розміру середньостатистичного нанокластера. Віддалі більше радіуса кореляції, що складає 10 нм, слід віднести до міжагрегатних. Агрегати суттєво анізотропні, мають еліпсоподібну форму з більшою піввіссю в напрямку росту плівки (висота агрегатів досягає 40 нм, тоді як латеральні розміри характеризуються радіусом кореляції 10 нм), як це видно з рис. 6, в.

Агрегація нанокластерів золота виявляється в оптичних спектрах вбирання, одержаних безпосередньо в процесі росту плівок. Еволюцію спектра вбирання в області плазмонного резонансу під час росту композитної плівки Au/PVCA представлено на рис. 7.

Для золотих нанокластерних плівок у діелектричній матриці характерно виявлення анізотропних коливань локальних плазмонів, положення яких визначається формою кластерів, поляризовністю матриці та міжкластерною взаємодією [33, 36]. Для латерально орієнтованих нанокластерів характерний зсув у синю область стосовно плазмонних коливань золотого сфероїда. Нормально орієнтовані локальні плазмони виявляються в червоному зсуві. Слабка взаємодія між нанокластерами призводить до розширення спектру [36]. З рисунка 7 видно, що в плівках наноконкомпозита з товщиною 10–15 нм переважають латерально орієнтовані кластери, тоді як із збільшенням товщини відносна частка нормально орієнтованих кластерів швидко збільшується. Зіставляючи нанокластерну топологію, одержану з даних ТЕМ, з еволюцією спектрів рис. 7, можна зробити висновок, що коливання окремих нанокластерів в агрегатах є зв'язаними, і в оптичних спектрах присутні частоти, характерні саме для агрегатів.

Процес агрегації нанокластерів золота під час росту композитної плівки з газової фази може бути пояснений корельованим рухом надкритичних металевих кластерів у склоподібній розм'якшеній матриці в результаті близькопольової взаємодії із зарядженими центрами [37]. Ефективний радіус точкового Кулонового центру в поляризованому органічному напівпровіднику становить біля 10 нм, що чудово відповідає радіусу кореляції агрегатів золотих нанокластерів рис 6, в в досліджуваному наноконкомпозиті Au/PVCA. Механізм



**Рис. 7.** Прояв агрегації нанокластерів золота в оптичних спектрах вбирання композита Au/PVCA під час росту плівки.

утворення заряджених центрів у результаті фотоелектронної та термоелектронної емісії з металевих наночастинок та його залежність від розмірів нанокластерів обговорювалася раніше [38].

## 7. ВИСНОВКИ

Тонкі однорідні шари фотопровідників на основі PVCa у вигляді дво-, трикомпонентних нанокompatитів органіка–неорганіка можна ефективно виготовляти осадженням з газової фази. Газофазне осадження продуктів карбазолу супроводжується частковою деполімерізацією та збагаченням продуктами розкладу карбазольного ядра, зокрема, азотомістячими, що викликає необхідність контролю низькомолекулярної фази. Не зважаючи на це, одержані в результаті газофазного осадження плівки є ефективними фотопровідниками внаслідок фотоіндукованого переносу заряду [39, 40]. Утворення комплексів переносу заряду PVCa при газофазному допуванні фуллереном  $C_{60}$  підтверджується високою електрофотографічною чутливістю плівок у видимій області [6], неадитивністю спектрів люмінесценції окремих компонент [20] та нелінійною залежністю вбирання комплексу карбазолу з фуллереном від інтенсивності освітлення [41].

Осадженням з газової фази одержано нанокompatити золото–PVCa і оцінено їх оптичні властивості. Важливою особливістю нанокompatитів золото–PVCa є агрегація золотих нанокластерів. У межах суттєво анізотропного агрегату, де середня віддаль між нанокластерами золота менше за їх середній діаметер, створюються умови для колективного плазмонного резонансу та керування його резонансними характеристиками за рахунок топології матеріального середовища. У подібних композитах слід очікувати яскравих виявів внутрішньої фотоемісії.

На основі газофазного PVCa виготовлено ефективні електретні темплати, в яких фотогенеровані та захоплені на глибокі пастки носії заряду мають достатньо велику концентрацію для впливу на процеси самоорганізації на поверхні та мають час релаксації порядку діб [6]. Темплати використані для формування наноструктур у процесах керованої самоорганізації [4, 5].

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. Р. Alivisatos, *J. Phys. Chem.*, **100**: 13226 (1996).
2. М. В. Алфимов, *Известия АН. Сер. хим.*, **7**: 1303 (2004).
3. Е. Л. Александрова, *Физика и техника полупроводников*, **38**, № 10: 1153 (2004).
4. Д. О. Гринько, Ю. М. Барабаш, Є. Г. Борщаківський, М. А. Заболотний, Л. Ю. Куницька, О. С. Литвин, С. О. Сперкач, М. Ю. Барабаш, *Наносисте-*

- ми, наноматеріали, нанотехнології, **6**, вип. 1: 91 (2008).
5. Д. О. Гринько, Е. О. Андреев, Ю. М. Барабаш, М. А. Заболотний, М. Ю. Барабаш, І. Е. Матяш, Л. Ю. Куницька, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **6**, вип. 3: 977 (2008).
  6. Г. Г. Влайков, М. Ю. Барабаш, М. А. Заболотний та ін., *Формування наноструктур темплантним синтезом* (Київ: ІМФ НАНУ: 2010).
  7. М. А. Заболотний, М. Ю. Барабаш, Д. А. Гринько, Ю. М. Барабаш, О. П. Дмитренко, Н. П. Кулиш, *Полімерний журнал*, **33**, № 4: 361 (2011).
  8. В. А. Барачевский, *Свойства светочувствительных материалов и их применение в голографии* (Ленинград: Наука: 1987).
  9. И. А. Акимов, Ю. А. Черкасов, М. И. Черкашин, *Сенсибилизированный фотоэффект* (Москва: Наука: 1980).
  10. H. Hoegl, *Journ. Chem. Phys.*, **39**, No. 3: 755 (1965).
  11. D. A. Grynko, V. V. Kislyuk, P. S. Smertenko, and O. P. Dimitriev, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**: 1 (2009).
  12. А. Л. Кукла, Д. А. Гринько, А. С. Павлюченко, В. А. Котляр, Ю. М. Барабаш, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **40**: 127 (2005).
  13. Э. А. Силиньш, В. А. Колесников, И. Я. Музиканте, Д. Р. Балодэ, А. К. Гайлис, *Известия Академии наук Латвийской ССР. Серия физических и технических наук*, **5**: 14 (1981).
  14. Yu. Barabash, V. Kharkyanen, M. Kulish, O. Dmitrenko, M. Zabolotny, E. Kobus, and N. Sokolov, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **5**, № 2: 641 (2007).
  15. L. Valkunas, V. Gubinas, and A. Undzenas, *Proc. Int Conf. Electronic Processes in Organic Materials*, **22B**: 54 (1998).
  16. J. Melz, *Journ. Chem. Phys.*, **57**, No. 4: 1694 (1972).
  17. L. Onsager, *Journ. Chem. Phys.*, **2**, No. 9: 599 (1934).
  18. Yu. M. Barabash, M. A. Zabolotny, and N. I. Sokolov, *Semiconductors Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, **2**, No. 4: 51 (1999).
  19. E. L. Alexandrova, *Proc. Conf. Silverless and Unusual Photographic Processes*, **1**, No. 1: 95 (1984).
  20. M. Baibarac, P. Gomez-Romero, M. Lira-Cantu, N. Casan-Pastor, and N. Messtres, *European Polymer Journal*, **42**: 2302 (2006).
  21. Jin-Woo Park, Eung-Kyoo Lee, Myon Cheon Choi, Hwajeong Kim, Jihwan Keum, Chang-Sik Ha, and Youngkyoo Kim, *Journal of Nanomaterials*, **2006**, Article ID 46787, 8 pages (2006). doi:10.1155/JNM/2006/46787.
  22. Mohamed Ben Khalifa, David Vaufrey, Abdelaziz Bouazizi, Jacques Tardy, and Hassen Maaref, *Materials Science and Engineering*, **21**: 277 (2002).
  23. Engying Li, Yuliang Li, Zhixin Guo, Yiming MO, Louzhen Fan, Fenglian Bai, and Daoben Zhu, *Solid State Communications*, **107**, No. 4: 189 (1998).
  24. Д. О. Гринько, В. В. Курдюков, О. О. Мужичок, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **40**: 195 (2005).
  25. E. Venes, *J. Appl. Phys.*, **56**, No. 3: 608 (1984).
  26. М. И. Ракитин, Д. А. Гринько, С. О. Сперкач, Ю. А. Куницкий, М. Ю. Барабаш, *II Міжнародна конференція «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології (НАНСИС-2007)» (21–23 листопада 2007 р., Київ)*, (Київ: ІМФ НАНУ: 2007), с. 341.
  27. А. Н. Антошин, Е. А. Гаспилович, В. Г. Клименко и др. *Колебательные спектры многоатомных молекул* (Москва: Наука: 1986).

28. Р. Шрайнер, Р. Фьюзон, Д. Кертил, Т. Морил, *Идентификация органических соединений* (Москва: Мир: 1983).
29. K. Naro, S. Chand, J.C. Bernéde, G. Safoula, and K. Alimi, *Journal of Materials Science*, **8**: 6219 (2005).
30. S. Ouro Djobo, J. C. Berneide, and S. Marsillac, *Synthetic Metals*, **122**: 131 (2001).
31. E. S. Kobus, O. P. Dmytrenko, N. P. Kulish, Yu. I. Prylutsky, D. A. Grynko et al., *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, **10**, No. 4: 67 (2007).
32. Д. Синто, Т. Оикава, *Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия* (Москва: Техносфера: 2006).
33. A. V. Goncharenko, D. A. Grynko, K. P. Grytsenko, and V. Z. Lozovsky, *J. of Nanosci. and Nanotechnol.*, **1**, No. 5: 1 (2005).
34. Min Guan, Zhu Qi Chen, Zu Qiang Bian, Zhi Wei Liu, Ze Liang Gong, Woonphil Baik, Hyun Joo Lee, and Chun Hui Huang, *Organic Electronics*, **7**: 330 (2006).
35. А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд, *Наночастицы металлов в полимерах* (Москва: Химия: 2000).
36. D. Grynko, K. Grytsenko, V. Lozovski, M. Sopinsky, and G. Strilchuk, *Materials Sciences and Applications*, **1**: 139 (2010).
37. С. В. Рафалович, Д. А. Гринько, *Physical and Chemical Principles of Formation and Modification of Micro- and Nanostructures* (Харків: 2008), vol. 2, p. 304.
38. С. А. Непийко, *Физические свойства малых металлических частиц* (Киев: Наукова думка: 1985).
39. M. A. Zabolotny, N. P. Kulish, Yu. I. Prylutsky, Yu. M. Barabash, D. A. Grynko, O. P. Dmytrenko, and E. S. Kobus, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **497**: 84 (2009).
40. N. P. Kulish, Yu. M. Barabash, M. A. Zabolotny, D. A. Grin'ko, O. P. Dmytrenko, and E. S. Kobus, *Physics of the Solid State*, **50**, No. 7: 1321 (2008).
41. M. A. Zabolotny, N. P. Kulish, Yu. M. Barabash, D. A. Grynko, O. P. Dmytrenko, E. S. Kobus, G. I. Dovbeshko, O. M. Fesenko, and Yu. P. Piryatinsky, *Solid State Physics*, **52**, No. 4: 826 (2010).