

М.Ю. Барабаш¹, Е.Л. Мартинчук¹, Ю.А. Куницький²

Газофазний синтез сполук карбазолу та властивості плівок нанокомпозитів

¹Технічний центр НАН України вул. Покровська, 13, 04070 Київ, Україна +38(044)4254424, e-mail: bashik_77@ukr.net

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01033, Київ-033, Володимирська 64, Україна

Досліджувались плівки, виготовлені на основі Poly (*N*-vinylcarbazole (PVCa), допованих акцепторними органічними та неорганічними напівпровідниковими сполуками та золотом. Показано, що доповнення PVCa донорно- акцепторними сполуками, зокрема CdSe, призводить до збільшення значень фотоіндукованого заряду. Комбінація провідних властивостей PVCa з іншими матеріалами робить їх привабливими багатофункціональними системами з великими можливостями, що можуть бути використані для електрофотографії, у якості сенсорів та в темплатних технологіях.

Ключові слова: хімічне осадження з газової фази, гетероструктура, темплат, плівки, фотопровідник, самоорганізація, нанокомпозити, донор, акцептор, карбазол.

Стаття постуила до редакції 23.10.2013; прийнята до друку 15.12.2013.

Вступ

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

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

Ефективним та технологічно привабливим способом виготовлення електростатичних темплатів є електрофотографічний метод [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, що широко використовується в електрофотографії, зокрема в технології сучасних лазерних принтерів. Переважна більшість даних щодо чутливих до структурно-хімічної будови властивостей молекулярних фотопровідних напівпровідників одержано на плівках, створених синтезом із розчинів [3, 8, 9]. Газофазні методи виготовлення тонкопліткових електрофотографічних реєструючих середовищ у порівнянні з рідинними дозволяють використовувати інші чинники для молекулярної організації таких нанокомпозитів 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 із вбудованим локальним полем, які можуть бути використані, наприклад, для синтезу сонячних перетворювачів [11] та в сенсоріці [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 у якості сенсорів та в темплатних технологіях [6].

В даній роботі досліджуються плівки, виготовлені на основі Poly (*N*-vinylcarbazole (PVCa), допованого акцепторними органічними та неорганічними напівпровідниковими сполуками та золотом в газофазних процесах. Передбачається, що доповнення PVCa донорно- акцепторними сполуками, зокрема CdSe, призводить до збільшення значень

фотоіндукованого заряду.

I. Об'єкти та методи досліджень

Методика газофазного синтезу композитів PVCa. Плівки нанокompозитів були отримані шляхом випаровування у вакуумі з декількох джерел і спільного осадження компонентів, переведених у газову фазу, за допомогою модифікованої установки ВУП-5 під управлінням комп'ютеризованої системи керування [6].

Компоненти плівок осаджували шляхом часткового термічного розкладання у вакуумі, переносу продуктів у молекулярному пучку на відстань 15 см та конденсації на підкладці при тиску залишкових газів до 3×10^{-2} Па. В окремих експериментах додаткове осадження плівок супроводжувалось впливом на пари електронного пучка енергією 0,7–1 кеВ густиною струму 1–3 мА/см².

Випаровування більшості полярних органічних молекулярних сполук нестабільне при постійній температурі субліматора, що створює проблеми для одержання багатокomпонентних композитів заданої сполуки. Тому для одержання плівок нанокompозитів із заданим розподілом компонентів по товщині плівки та інтегральним складом була використана система автоматичного регулювання процесу вирощування плівок. Функціональна схема керування таким технологічним процесом наведена на рис. 2.

Сигнали кварцових датчиків-свідків маси, що випаровувались, кожного з компонентів плівки використовувались для керування їх молекулярними потоками в реальному масштабі часу. Чутливість кварцових датчиків становила $6 \dots 10^{-8}$ кг/м², програмно контрольований дрейф частоти не перевищував 10 Гц/год. Програмування комплексу виконане мовою LabVIEW. Для переміщення підкладок у камері, в процесі вирощування використовувався програмно-керований маніпулятор планетарного типу. Експозиція підкладок у пучках сублімованих молекул та вільних радикалів здійснювалася за допомогою керованих заслінок. Спектрофотометр на основі фотодіодної лінійки та дифракційної ґратки дозволяє реєструвати спектри поглинання плівок безпосередньо в процесі росту, а також досліджувати та контролювати процеси хімічної взаємодії, агрегації та адсорбції у композитах.

Необхідний профіль концентрації компонентів по товщині плівки композиту та кінетика росту програмувалися як цільові функції.

Виготовлення структур на основі PVCa. Плівки PVCa товщиною близько 300 нм отримували з газової фази шляхом часткового термічного розкладання у вакуумі порошку полімеру PVCa (сер. мол. маса 10 000), переносу продуктів в молекулярному пучку на відстань 15 см та конденсації на підкладці. Процес осадження плівки PVCa супроводжувався додатковим впливом

на пари електронним пучком.

Плівки CdSe були виготовлені шляхом термічного випаровування з вольфрамового випарника.

Плівки нанокompозитів CdSe/PVCa одержували одночасним осадженням у вакуумі, шляхом термічного випаровування, з двох джерел методом пошарового нашарування на підкладці. При напиленні використовувались різні типи підкладок: скляні, ITO, Si, KBr та скляні із шаром золота.

Схема гетероструктури CdSe-PVCa і структура плівки нанокompозиту CdSe/PVCa приведена на рис 1. Гетероструктура CdSe/PVCa складається з декількох шарів. Часова залежність процесу вирощування нанокompозиту 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

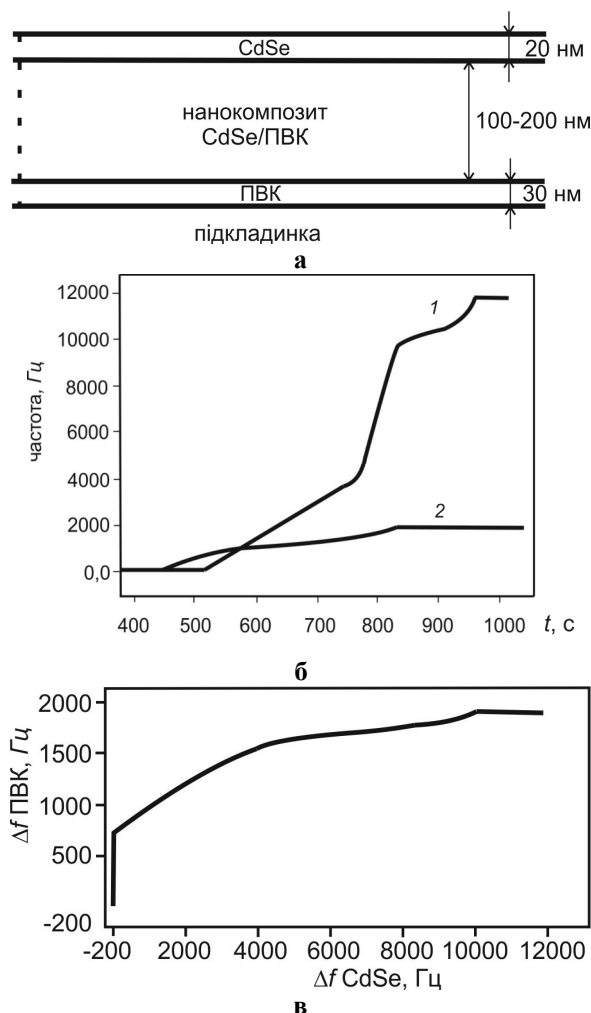


Рис. 1. Схема гетероструктури плівки на основі нанокompозиту CdSe/PVCa (а); б – зміна частоти кварцових датчиків маси в процесі вирощування гетероструктури CdSe/PVCa: 1 – CdSe; 2 – PVCa; в – параметрична залежність частоти резонаторних кварцових датчиків, пропорційної масі двох компонентів у процесі вирощування гетероструктури CdSe/PVCa.

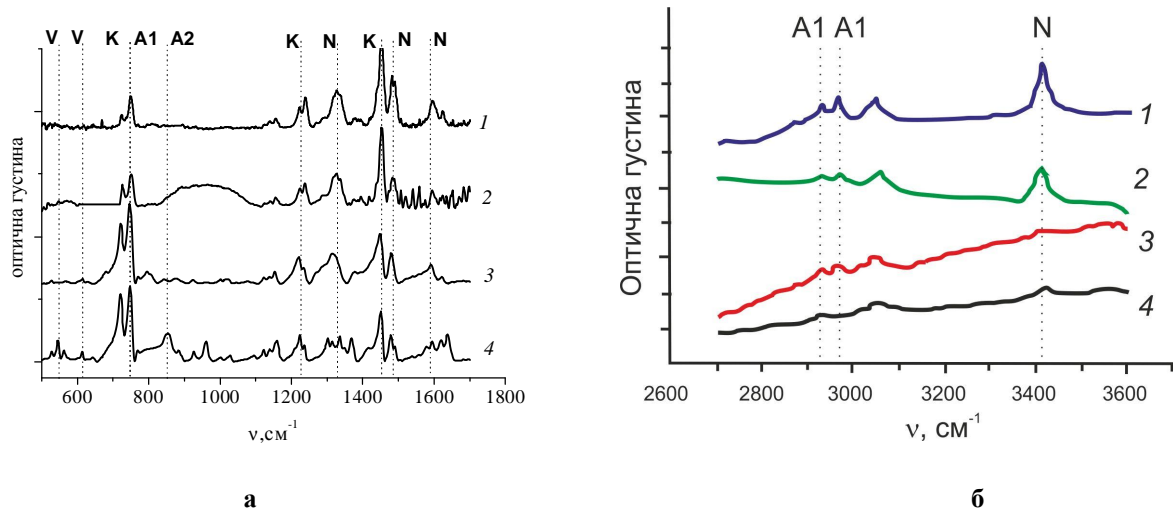


Рис. 2. Спектри поглинання в діапазоні *а* – 1700-500 cm^{-1} , *б* – 2700-3600 cm^{-1} : 1 – TPVCa, 2 – IPVCa, 3 – PVCa, 4 – MNVCa.

випаровування PVCa було припинено і структура була закрита зверху тонким шаром CdSe. Ідентифікація форм карбазолу за інфрачервоними спектрами. З метою дослідження особливостей будови одержаних осадженням із газової фази плівок були виміряні ІЧ спектри плівок, що містять карбазол та порошок (Poli) *N*-vinylcarbazole і (Mono) *N*-vinylcarbazole.

Речовини наносилися на підкладки із кремнію марки КДБ, покриті плівкою золота товщиною близько 200 нм, термічно напиленого у вакуумі.

Плівки PVCa товщиною близько 300 нм отримували з газової фази шляхом часткового термічного розкладення у вакуумі порошку полімера PVCa (сер. мол. маса 10 000), переносу продуктів в молекулярному пучку в камері і конденсації на підкладці (позначені TPVCa). Також було виготовлено плівки PVCa, процес осадження яких супроводжувався додатковим впливом на пари електронним пучком (позначені IPVCa). Отримані з газової фази у вакуумі плівки, що містять карбазол порівнювали з осадами із вихідного PVCa (позначені PVCa) і (Mono) *N*-vinylcarbazole (позначені MNVCa), нанесеними у вигляді тонкорозмеленого порошку на ті ж підкладки у звичайних умовах.

Вимірювання спектрів поглинання проводили у відбитому від підкладок з об'єктом пучка у проточній кюветі в атмосфері осушеного азоту. Спектри реєструвалися в діапазоні 400-4000 cm^{-1} із часом накопичення 30-60с.

II. Результати досліджень та їх обговорення

Спектри поглинання в діапазонах 2700 - 3600 cm^{-1} і 1700 - 500 cm^{-1} наведені на рис. 2. У спектрах всіх об'єктів можна виділити [24] характеристичну для карбазолу область 650-1650 cm^{-1} (рис. 4, *а*, *б*) з інтенсивними коливаннями (коливання К) 722 cm^{-1} (деформаційні коливання ароматичного кільця),

1220 cm^{-1} (плоскі коливання груп СН ароматичного кільця), 1230 cm^{-1} (CN коливання), 1450 cm^{-1} (несиметричні коливання карбазолу). У спектрах також є смуги середньої інтенсивності 744, 700-750, 2900 - 3000 cm^{-1} (група А1), які можна віднести до коливань СН груп вуглеводнів алканового ряду, 530 – 640 cm^{-1} (коливання V (коливання олефінових і вінілових груп) і 3390 – 3180 cm^{-1} , 1480 – 1580 cm^{-1} , 1300 – 1350 cm^{-1} (коливання N (коливання NH груп у різному валентному оточенні).

Коливання в плівках TPVCa і IPVCa 530 - 640 cm^{-1} відсутні, тоді як вони яскраво проявляються в зразку MNVCa і слабше в PVCa, що свідчить про наявність вінілових груп. Смуги 850 - 1074 cm^{-1} (коливання А2) 3-3' коливання олефінових груп) слабо проявляються в TPVCa і мають відносно високу інтенсивність для MNVCa. Інтенсивність коливань N мінімальна в PVCa. В області несиметричних коливань ароматичних груп (850 – 950 cm^{-1} , 1095 cm^{-1} , 1369 cm^{-1} , 1599 – 1700 cm^{-1}) 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, наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Відносні інтенсивності смуг, нормованих на інтенсивність смуг групи карбазолів (К)

Група коливань	PVCa	MNVCa	TPVCa	IPVCa
К(карбазолі)	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 ₂ групи)	0,746	0,48	3,6	2,75

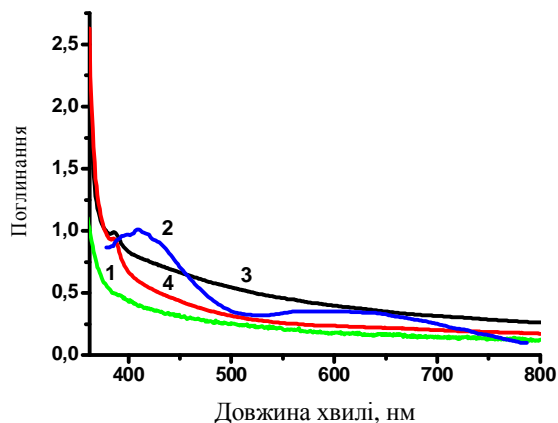


Рис. 3. Спектри поглинання нанокompозитів PVCa з акцепторами: 1 –PVCa, 2 – композит PVCa /CdSe 15% ваг., 3 – композит PVCa /C₆₀ 11% ваг., 4 – композит PVCa /TNF 15% ваг.

дозволяє співставити молярну долю різних структурно-хімічних фрагментів по відношенню до

карбазолу. Таким чином:

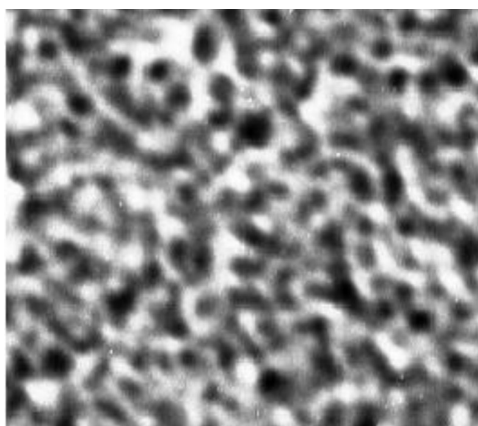
вінілові групи присутні як в MNVCa так і в невеликій концентрації в PVCa, і відсутні в продуктах газофазного осадження;

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

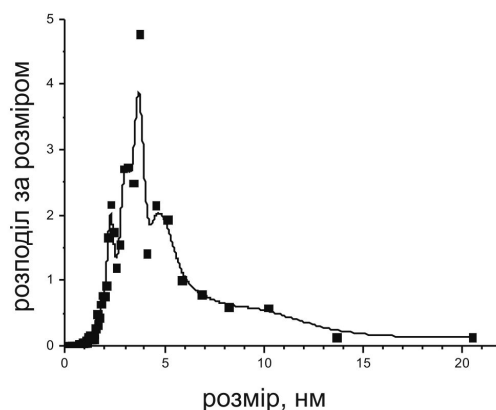
відносна інтенсивність коливань полімерного каркасу на основі алканів свідчить про дещо меншу олігомерність продукту газофазного осадження TPVC порівняно з IPVCa і PVCa;

у вихідному PVCa концентрація груп NH незначна і помітно більша в продуктах TPVCa, IPVCa.

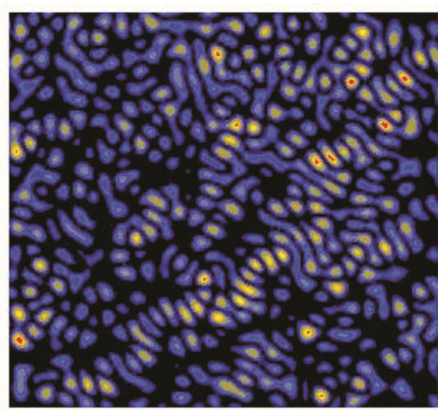
Композити PVCa із сильними акцепторами. Одержані плівки нанокompозитів із сильними акцепторами фулереном C₆₀ та тринітрофлуореноном (TNF). В спектрах поглинання нанокompозитів (рис. 3) присутні смуги поглинання,



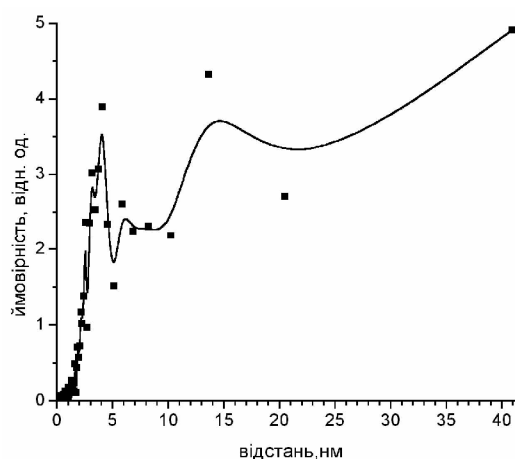
а



б



в



г

Рис. 4. Нанокластерна структура композитної плівки Au/PVCa 24% мас. металу: *а* – просвічуюча 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.

які можуть бути віднесені до комплексів із переносом заряду. Формування КПЗ у композитах PVCa/C₆₀ також спостерігалось у [25] як результат неадитивності спектрів люмінесценції окремих компонентів.

Більша ширина смуг КПЗ в композитах (рис. 3) у порівнянні із плівками, одержаними з розчинів [6,24] може бути пов'язана з більшою розупорядкованістю плівок та відповідно більшим розкидом значень енергії кулонівської взаємодії поляризованих станів молекулярного композиту з екрануючим оточенням.

Композити PVCa із золотом. Плівки нанокompatитів Au/PVCa виготовляли одночасною конденсацією з газової фази. Золото випаровували терморезистивним методом. Нанокластерна структура композитної плівки Au/PVCa 24 % ваг. металу, товщиною біля 40 нм, досліджена методом просвічуючої електронної мікроскопії за допомогою мікроскопу JEM-1230 (фірма JEOL, Японія) з роздільною здатністю 0,5 нм., представлена на рис. 4,а. Нанокластери мають форму, близьку до сферичної із розміром середньостатистичного нанокластера золота біля 5 нм. Розподіл золотих нанокластерів за розмірами рис. 4,б, топологію просторового розташування агрегатів із золотих нанокластерів (рис. 4,в) та функцію розподілу відстаней в цих агрегатах (рис. 4,г) визначали за допомогою чисельного Фурє- та кореляційного-аналізу фрагментів вихідного зображення [6, 24, 25].

Аналіз розподілу оптичної густини на ТЕМ-зображеннях свідчить про те, що агрегація золотих нанокластерів є суттєвою особливістю композитної плівки Au/PVCa. Відстань між нанокластерами в агрегатах лежить в інтервалі 2-5 нм з найімовірнішим значенням 4 нм, тобто менше розміру середньостатистичного нанокластеру. Розподіл більше 10 нм слід віднести до міжагрегатних відстаней. Агрегати суттєво анізотропні, мають еліпсоподібну форму із більшою напіввіссю в напрямі росту плівки, як це видно з рис. 4,в.

Агрегація нанокластерів золота проявляється в оптичних спектрах поглинання, одержаних безпосередньо в процесі росту плівок. Еволюція спектра поглинання в області плазмонного резонансу під час росту композитної плівки рис.4 представлена на рис.5.

Для золотих нанокластерних плівок у діелектричній матриці характерно проявлення анізотропних коливань локальних плазмонів, положення яких визначається формою кластерів, поляризованістю матриці та міжкластерною взаємодією [22]. Для латерально орієнтованих нанокластерів характерний зсув у синю область по відношенню до плазмонних коливань золотого сфероїда. Нормально орієнтовані локальні плазмони проявляються у червоному зсуві. Слабка взаємодія між нанокластерами призводить до уширення спектру [22].

З рис. 5 видно, що у плівках нанокompatиту із товщиною 10–15 нм переважають латерально орієнтовані кластери, тоді як із збільшенням товщини відносна доля нормально орієнтованих кластерів

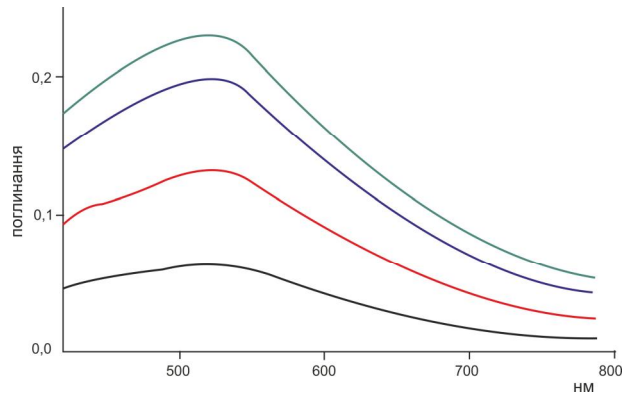


Рис. 5. Процес об'єднання нанокластерів золота в оптичних спектрах поглинання.

швидко збільшується. Співставляючи нанокластерну топологію, одержану з даних ТЕМ, з еволюцією спектрів рис. 5, можна зробити висновок, що коливання окремих нанокластерів в агрегатах є зв'язаними і в спектрах присутні частоти, характерні саме для агрегатів.

Процес агрегації нанокластерів золота під час росту композитної плівки з газової фази обумовлений корельованим рухом надкритичних металевих кластерів у склоподібній розм'якшеній матриці в результаті ближнеполевої взаємодії з зарядженими центрами. Ймовірність утворення заряджених центрів в результаті фотоелектронної та термоелектронної емісії з металевих нанокластерів обговорювалася в [24-27].

Висновки

Тонкі однорідні шари фотопровідників на основі PVCa у вигляді дво- трьох компонентних нанокompatитів органіка-неорганіка можна ефективно виготовляти осадженням з газової фази. Газофазне осадження продуктів карбазолу супроводжується частковою деполімеризацією та збагаченням продуктами розкладу карбазольного ядра, зокрема азотовмістними, що викликає необхідність контролю низькомолекулярної фази. Одержані в результаті газофазного осадження плівки є ефективними фотопровідниками внаслідок фотоіндукованого переносу заряду. Утворення комплексів переносу заряду PVCa при газофазному допуванні фулереном C₆₀ підтверджується високою електрофотографічною чутливістю плівок у видимій області, неадитивністю спектрів люмінесценції окремих компонентів та нелінійною залежністю поглинання комплексу карбазолу з фулереном від інтенсивності освітлення.

Осадженням з газової фази отримані нанокompatити золото- PVCa і оцінені їх оптичні властивості. Важливою особливістю нанокompatитів золото- PVCa є агрегація золотих нанокластерів. В межах анізотропного агрегату, де середня відстань між нанокластерами золота менше за їх середній діаметр, створюються умови для колективного

плазмонного резонансу та керування його резонансними характеристиками за рахунок топології матеріального середовища. В подібних композитах слід очікувати яскравих проявів 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. Темплати використані для формування наноструктур в процесах керованої самоорганізації.

- [1] A.P. Alivisatos, *J. Phys. Chem.* 100, 13226 (1996).
- [2] M.V. Alfimov, *Izvestija AN. Ser. him.* (7), 1357 (2004).
- [3] E.L. Aleksandrova, *Fizika i tehnika poluprovodnikov.* 38(10), 1153 (2004)
- [4] D.O. Grin'ko, Ju.M. Barabash, Є.G. Borshhagiv's'kij, M.A. Zabolotnij, L.Ju. Kunic'ka, O.C. Litvin, S.O. Sperskach, M.Ju. Barabash, *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii.* 6(1), 91 (2008).
- [5] D.O. Grin'ko, E.O. Andreev, Ju.M. Barabash, M.A. Zabolotnij, M.Ju. Barabash, I.E. Matjash, L.Ju. Kunic'ka, *Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii.* 6(3), 977 (2008).
- [6] G.G. Vlajkov, M.Ju. Barabash, M.A. Zabolotnij *ta in., Formuvannja nanostruktur templantnim sintezom (IMF NANU, Kii'v, 2010).*
- [7] M.A. Zabolotnyj, M.Ju. Barabash, D.A. Grin'ko, Ju.M. Barabash, O.P. Dmitrenko, N.P. Kulish. *Polimernij zhurnal* 33(4), 361 (2011).
- [8] *Svoystva svetochuvstvitel'nyh materialov i ih primenenie v golografii //sb.nauch.tr. / red. Barachevskij V.A. (Nauka, Leningrad, 1987).*
- [9] I.A. Akimov, Ju.A. Cherkasov, M.I. Cherkashin, *Sensibilizirovannyj fotojefekt (Nauka, Moskva, 1980).*
- [10] H. Hoegl, *Journ. Chem. Phys.* 39(3), 755 (1965).
- [11] D.A. Grynko, V.V. Kislyuk, P.S. Smertenko and O.P. Dimitriev, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42(19), 195104 (2009)/
- [12] A.L. Kukla, D.A. Grin'ko, A.S. Pavljuchenko, V.A. Kotljars, Ju.M. Barabash, *Optoelektronika i poluprovodnikovaja tehnika*, 40, 127 (2005).
- [13] Je.A. Silin'sh, V.A. Kolesnikov, I.Ja. Muzikante, D.R. Balode, A.K. Gajlis, *Izvestija Akademii Nauk Latvijskoj SSR serija fizicheskikh i tehniceskikh nauk.* 5(14), 14 (1981).
- [14] Yu. Barabash, V. Kharkyanen, M. Kulish, O. Dmitrenko, M. Zabolotny, E. Kobus and N. Sokolov, *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies.* 5(2), 641 (2007).
- [15] L. Valkunas, V. Gubinas, A. Undzenas, *Proc. Int Conf. Electronic Processes in Organic Materials.* 22B, 54 (1998).
- [16] Peter J Melz, *J. Chem. Phys.* 57(4), 1694 (1972).
- [17] L. Onsager, *Journ. Chem. Phys.* 2(9), 599 (1934).
- [18] Yu.M. Barabash, M.A. Zabolotny, N.I. Sokolov, *Semiconductors physics, quantum electronics and optoelectronics.* 2(4) (1), 51 (1999).
- [19] E.L. Alexandrova, *Proc. conf. Silverlos and unusual photographic processes* 1(1), 95 (1984).
- [20] M. Baibarac, P. Gomez-Romero, M. Lira-Cantu, N. Casan-Pastor, N. Mestres, *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.* 1, 1 (2006).
- [22] Mohamed Ben Khalifa, David Vaufrey, Abdelaziz Bouazizi, Jacques Tardy, Hassen Maaref, *Materials Science and Engineering.* 21, 277 (2002).
- [23] Li. Engying, Li. Yuliang, Guo Zhixin, MO. Yiming, Fan. Louzhen, *Solid State Communications.* 107(4), 189 (1998).
- [24] A.V. Goncharenko, D.A. Grynko, K.P. Grytsenko, V.Z. Lozovsky, *J. of Nanosci. and Nanotechnol.* 5(11), 1919 (2005).
- [25] E.S. Kobus, O.P. Dmytrenko, N.P. Kulish, Yu.I. Prylutsky, D.A. Grynko et.al., *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* 10(4), 67 (2007).
- [26] M.A. Zabolotny, N.P. Kulish, Yu.I. Prylutsky, Yu.M. Barabash, D.A. Grynko, O.P. Dmytrenko, E.S. Kobus, *Mol.Cryst. Liq. Cryst.* 497, 84 (2008).
- [27] N.P. Kulish, Yu.M. Barabash, M.A. Zabolotny, D.A. Grin'ko, O.P. Dmitrenko, E.S. Kobus, *Physics of the Solid State.* 50(7), 1321 (2008).

M.Yu. Barabash¹, E.L. Martynchuk¹, Yu.A. Kunitsky²

Gas-Phase Synthesis of Carbazole Compounds and Properties of the Films Nanocomposites

¹*Technical Center, National Academy of Science of Ukraine, Kiev, Ukraine*

²*Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, Ukraine*

Thin films made on the basis of Poly (N-vinylcarbazole (PVCA) doped with acceptor organic and inorganic semiconducting compounds and gold is investigated. It is envisaged that the doping PVCA donor-acceptor compounds in particular CdSe, should lead to an increase in the values of the photoinduced the charge. The combination of the properties held by PVCA with other materials makes these materials attractive multifunctional systems with great potential that can be used to elektrophoto as sensors and templating technologies.