

(ПГ $Pn\bar{m}$)). Найбільша розчинність спостерігається на основі In_2Se_3 у системі $\text{NiSe} - \text{In}_2\text{Se}_3$ і сягає граничного складу 25 мол. %.

У сульфідних системах утворюються тетраарні сполуки $\text{Pr}_3\text{NiGa(In)}\text{S}_7$ (ПГ $P6_3$) [1]. Тетраарні сполуки у селенідних системах не утворюються.

У результаті проведеного рентгенофазового аналізу побудовано ізотермічні перерізи квазіпотрійних систем $\text{Pr}_2\text{X}_3 - \text{NiX} - \text{Ga(In)}_2\text{X}_3$ ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}$) за температури 770 К, що дало змогу встановити характер фазових рівноваг, кількість і склад одно-, дво- та трифазних областей, а також межі твердих розчинів. Показано, що сульфідні системи характеризуються більшою фазовою складністю порівняно з відповідними селенідними системами, що проявляється в утворенні тетраарних сполук типу $\text{Pr}_3\text{NiGaS}_7$ та $\text{Pr}_3\text{NiInS}_7$ зі структурою гексагонального типу (ПГ $P6_3$).

Встановлено, що в селенідних системах тетраарні сполуки не утворюються, а фазові рівноваги обмежуються тернарними фазами та двофазними рівновагами, які триангулюють концентраційні трикутники на простіші підсистеми. Така відмінність у фазоутворенні між сульфідними та селенідними системами вказує на суттєвий вплив природи халькогену на стабільність складних халькогенідних сполук і кристалохімічні механізми їх формування.

Показано, що розчинність на основі більшості вихідних компонентів є обмеженою, однак у системах за участю In_2X_3 спостерігається помітне розширення областей твердих розчинів, зокрема в квазібінарних системах $\text{NiX} - \text{In}_2\text{X}_3$, що свідчить про підвищену структурну сумісність відповідних фаз. Отримані результати розширюють фізико-хімічні уявлення про закономірності фазоутворення в багатокомпонентних халькогенідних системах із рідкісноземельними елементами та створюють надійну основу для подальших цілеспрямованих досліджень структурних і функціональних властивостей виявлених сполук з огляду на їх потенційне прикладне використання.

Список літератури

- [1]. Rudyk B.W., Stoyko S.S., Oliyuk A.O., Mar A. *Rare-earth transition-metal gallium chalcogenides $\text{RE}_3\text{MGaCh}_7$ ($M=\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}; \text{Ch}=\text{S}, \text{Se}$)*, J. Solid State Chem., 210, 79-88 (2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.jssc.2013.11.003>

Наноплазмоніка як перспективний напрям розвитку електроніки

Іван Болеста, Богдана Калівошка

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра радіофізики та комп'ютерних технологій,
e-mail: bogdana.kalivoshka@lnu.edu.ua*

На сьогоднішньому етапі розвитку науки і технологій наночастинки та наноструктури, створені на їхній основі, відіграють ключову роль у низці передових напрямів, зокрема в оптиці, фотоніці, біомедицині та матеріалознавстві. Серед різноманіття наночастинок особливе місце займають металічні, що зумовлено їхньою унікальною здатністю до сильної локалізації електромагнітного поля, ефективного поглинання та розсіювання світла, і пояснюється явищем локального плазмонного резонансу [1; 2]. Металічні наночастинки широко застосовують у хімічних технологіях, зокрема як ефективні каталізатори у гетерогенних реакціях, що значною мірою зумовлено їхньою великою питомою поверхнею та специфічними електронними властивостями [3].

Наночастинки є важливим «будівельним матеріалом» для створення нового типу наноструктурованих композитних матеріалів, які мають унікальні властивості, корисні для практичного використання [4 – 6]. До них, насамперед, слід віднести фотонні

кристали, метаматеріали з від'ємним значенням показника заломлення і структури, у яких спостерігаються квантові ефекти, які реєструються за кімнатних температур, що відкриває принципово нові можливості їхнього застосування.

В останні роки металічні наночастинки використовують для створення одно-, дво- і тривимірних нанорозмірних структур та пристроїв на основі ДНК [7].

Оптичні властивості наночастинок змінюються, коли частинки агрегуються та утворюють кластери. Електрони провідності поблизу кожної поверхні частинок делокалізуються і стають спільними для сусідніх частинок. Вивчення властивостей кластерів, залежно від числа атомів, що входять до їхнього складу, дало можливість виявити принципово нові явища, не притаманні ні окремим атомам, ні твердим тілам [8]. Це сприяло розвитку нового напрямку електроніки – наноплазмоніки.

Фізичні основи наноплазмоніки ґрунтуються на ефектах, пов'язаних з коливанням вільних електронів у наночастинках під дією електромагнітного випромінювання, що зумовлює появу електромагнітних полів, локалізованих біля поверхонь наночастинок (так звані «гарячі точки»), які суттєво підвищують величину світлового поля.

Елементна база наноплазмоніки – металічні наночастинки і структури, сформовані на їхній основі. Важливість і перспективність даного напрямку полягають у тому, що наноплазмоніка суміщає нанометрові розміри приладів та сенсорів з оптичними частотами їхнього функціонування.

Аналіз історії технологічних проривів і сучасний стан наноплазмоніки в методології циклу надочікувань Гартнера (Gartner Hype cycle) [9] показав, що упродовж останнього десятиліття ця методологія успішно застосовується для різноманітних технологій і є ефективним способом їхньої адаптації до реальних промислових проблем (рис. 1).

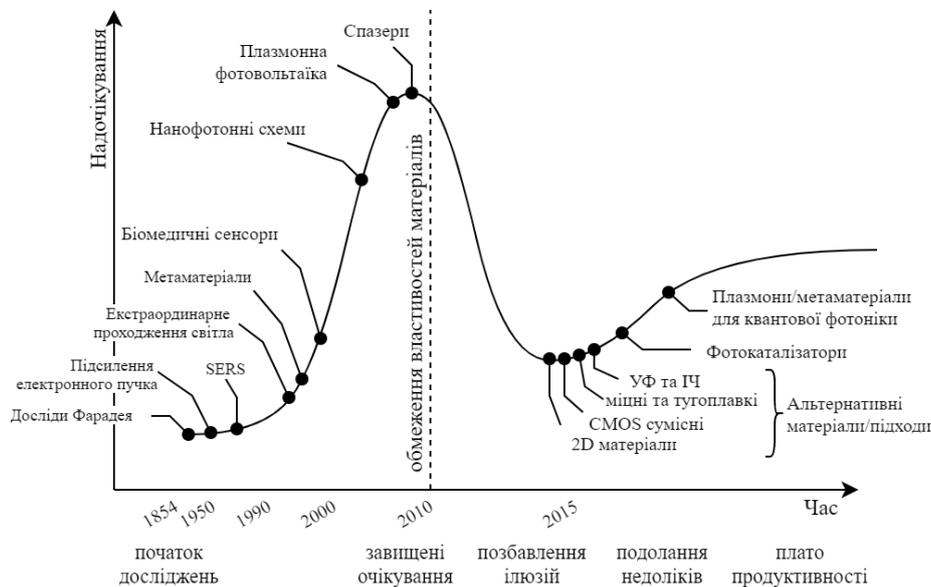


Рис. 1. Цикл надочікувань Гартнера для галузі плазмоніки [9]

З кінця XX і початку XXI століть спостерігається зростання очікувань, пов'язаних із відкриттям гігантського підсилення комбінаційного розсіювання світла молекулами за наявності наноструктурованих металічних поверхонь чи острівцевих плівок (SERS – surface enhanced Raman scattering). Виявлено вплив наночастинок на люмінесценцію окремих молекул та/або нанокристалічних квантових точок. Це дозволяє створювати сенсори, здатні реєструвати окремі молекули. На сьогодні цей напрям є одним із найважливіших у розвитку науки і технологій.

Наступним кроком вважається екстраординарне проходження світлової хвилі через наноотвори, на основі якого створені сканувальні оптичні мікроскопи ближнього поля, що дають змогу досліджувати окремі молекули, та реалізовано оптичну літографію із субнанометровим розділенням.

Подальший розвиток технологій сприяв отриманню метаматеріалів – штучних матеріалів, у яких замість атомів використовують наночастинки. Змога впливу на форму та природу наночастинок і на їхнє розміщення створює перспективу отримання матеріалів, властивості яких принципово відрізняються від природних матеріалів (покриття-невидимки на основі плазмонних матеріалів, супер- та гіперлінзи – оптичні нанопристрої, які дозволяють отримувати зображення з поперечним розділенням, меншим від довжини хвилі, ідеальні лінзи тощо).

З початком XXI століття розпочались інтенсивні дослідження з метою створення елементної бази для інтегральних схем на плазмонах, використання плазмонів в енергетиці і створення спазерів (SPASER – surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation) – аналогів лазера, у якому замість фотонів використовують плазмони.

Об'єднання плазмоніки з матеріалознавством та хімією може забезпечити нові рішення і принести технологічний прогрес у багатьох сферах застосування. У цьому аспекті важливе значення належить комп'ютерному моделюванню, оскільки проведення лабораторних експериментів обмежується складною технологією отримання наночастинок та формування структур на їхній основі.

У результаті проведеного наукометричного аналізу в галузі наноплазмоніки зроблено оцінку міжнародної практики наукометричних досліджень, яка ґрунтується, головню, на використанні наукометричних баз даних, серед яких SciVerse Scopus.

На рис. 2 подано перелік країн, у яких найбільш інтенсивно вивчають проблеми наноплазмоніки, а також місце України у цьому переліку.

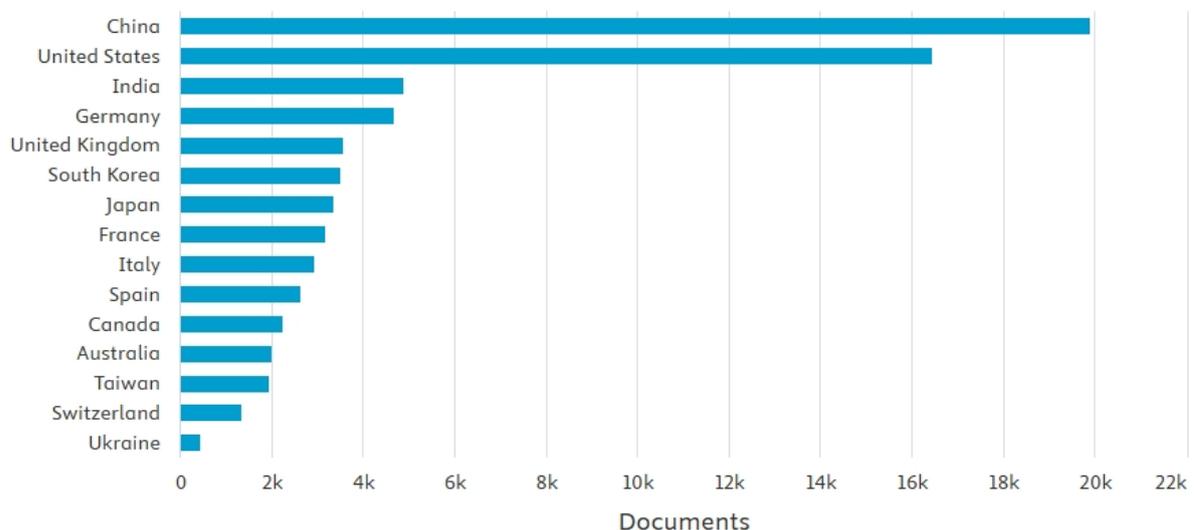


Рис. 2. Країни, у яких проводять дослідження в галузі наноплазмоніки

Лідерами досліджень у цій галузі є Китай і Сполучені Штати Америки. У другому ешелоні – країни Європейського Союзу, Японія, Південна Корея та Індія. У 2021 році Китай випередив США за кількістю публікацій у сфері наноплазмоніки. Водночас за ті ж чотири роки кількість публікацій в Україні подвоїлась.

Проблемами фізики, технологій та використання металічних наночастинок у нашій країні займаються провідні наукові центри Києва (Інститут фізики НАН України, Інститут напівпровідників НАН України, Київський національний університет імені

Тараса Шевченка), Львова (Львівський національний університет імені Івана Франка, Національний університет «Львівська Політехніка», Інститут біології клітин НАН України) та інші наукові центри.

Список літератури

1. Кривошеїн В. І., Іванченко В. М. Нанотехнології: сучасний стан і перспективи. – Київ : Наукова думка, 2013. – 320 с.
2. Венгер Є. Ф., Гончаренко А. В., Дмитрук Л. М., Оптика малих частинок і дисперсних середовищ. – Київ : Наукова думка, 1999.
3. Somorjai G. A., Li Y. Introduction to Surface Chemistry and Catalysis. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2010. – 784 p.
4. Joannopoulos J. D., Johnson S. G., Winn J. N., Meade R. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. – 2nd ed. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 304 p.
5. Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire M. C. K. Metamaterials and negative refractive index // Science. – 2004. – Vol. 305. – P. 788–792.
6. Rao C. N. R., Müller A., Cheetham A. K. (Eds.). The Chemistry of Nanomaterials: Synthesis, Properties and Applications. – Weinheim : Wiley-VCH, 2004. – Vol. 1. – 856 p.
7. Kuzyk A., Jungmann R., Acuna G. P., Liu N. DNA Origami Route for Nanophotonics // ACS Photonics. – 2018. – Vol. 5. – P. 1151–1163.
8. Castleman A.W., Bowen K.H. Clusters: Structure, Energetics, and Dynamics of Intermediate States of Matter // J. Phys. Chem. – 1996. – Vol. 100. – P. 12911 – 12944.
9. Gulera U., Kildisheva A. V., Itasseva A., Shalae V. M. Plasmonics on the slope of enlightenment: the role of transition metal nitrides. Faraday Discussions. – 2015. – Vol. 178. – P. 71–86.

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДРОНІВ ЗА УМОВИ МАЛОГО РАДІУСУ ОБМІНУ СИГНАЛАМИ

Вілігурський Олег Миколайович

*Волинський національний університет імені Лесі Українки, проспект Волі, 13, Луцьк,
Україна, 43025*

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3763-2577>

viligurskyi@gmail.com

Існує багато способів збільшення живучості безпілотних літальних апаратів (Шкітов, 2024). Йдеться про способи протидії засобам радіоелектронної боротьби (РЕБ) і протиповітряної оборони. Для зменшення вразливості перед РЕБ використовують, зокрема, криптографічний захист сигналів, частотну агрегація, використання фізичних бар'єрів, автономні режими польоту (з закриттям усіх радіоканалів зв'язку з оператором), створення унікального програмного забезпечення для БПЛА, оптоволоконні канали зв'язку. У зазначених способах йдеться про забезпечення живучості в однаковій мірі кожного з бойових чи розвідувальних дронів. Але перспективним є також принципово інший підхід, який полягає у використанні відносно великої сукупності дронів, кожен з яких, наприклад, несе невеликий вибуховий заряд. При цьому нема потреби забезпечувати прямий зв'язок кожного з дронів з оператором. Дрони можуть утворювати організовану «хмару» чи «рій», де забезпечений мінімальний обмін сигналами між окремими елементами хмари і, можливо, якимось центральним дроном. Зв'язок з оператором в такому разі потрібний тільки для центрального дрона. Захист центрального дрона від засобів РЕБ ми тут не розглядаємо.

Перевагою такої системи є те, що вона може бути стійкою до втрати доволі великого числа елементів, зберігаючи при цьому свою функціональність. А оскільки відстані між дронами у рої значно менші за відстань до оператора чи цілі, то для обміну сигналами між дронами можна використати технології близького зв'язку, стійкіші до засобів РЕБ.