

УДК 621.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

Оксана ЗАМУРУЄВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Віктор НАХОД

аспірант кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57759051000

Бібліографічний опис статті: Замуруєва, О., Наход, В. (2023) Аналіз створення матеріальної моделі складних процесів формування гетероструктур. *Фізика та освітні технології*, 3, 31–36, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Мета роботи провести аналіз досліджень, які стосуються моделювання процесів формування гетероструктур. Визначити особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку в Україні.

Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus за ключовими словами «modeling of heterostructures» і «modeling of heterostructure formation». Для порівняльного аналізу відібрано статті з пошуку у назві статті, анотації і ключових словах у 2 039 наукових працях за останні 20 років. Проаналізовано країни і наукові організації авторів, наявність фінансової підтримки досліджень, самі публікації, а також найпопулярніші і найцитованіші видання, у яких здійснено публікацію, їх кількість та приналежність до галузі знань.

Проаналізовано публікації авторитетних світових науковців у галузі моделювання гетероструктур для розуміння закономірностей підтримки та розвитку цього напрямку у світі і в Україні, визначення перспектив нових досліджень. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі. Сформульовано пропозиції для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямом.

Світові науковці намагаються знайти практичне застосування результатів своїх досліджень. Також, часто такі напрями визначаються наявною матеріальною базою, розробленим програмним забезпеченням, або публікаціями у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

Із аналізу за двома пошуковими запитамі із 2 039 і 166 наукових праць за період 2002-2023 рр. більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими зі США. Установи, де проводяться передові дослідження з даної тематики, зосереджено у провідних науково-дослідних центрах: CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University тощо.

Ключові слова: наукометрична база, моделювання, гетероструктури, наукові дослідження, галузі знань.

Oksana ZAMURUIEVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

ORCID ID: 0000-0003-0032-0613

SCOPUS-AUTHOR ID: 56181742100

Viktor NAKHOD

PhD student of the Department of Theoretical and Computer Physics named by A. V. Svidzynskiy, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025

SCOPUS-AUTHOR ID: 57759051000

To cite this article: Nahod, V., Zamuruieva, O. (2023). Analiz stvorennia materialnoi modeli skladnykh protsesiv formuvannia heterostruktur [Analysis of the creation of a material model of component processes of formation of heterostructures]. *Physics and Educational Technology*, 3, 31–36, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-3-4>

ANALYSIS OF THE CREATION OF A MATERIAL MODEL OF COMPONENT PROCESSES OF FORMATION OF HETEROSTRUCTURES

The purpose of the work is to conduct an analysis of studies related to the modeling of heterostructure formation processes, to make an attempt to determine the peculiarities of the development of this topic in the world and to find ways of effective development of this direction in Ukraine.

An analysis of publications indexed in the Scopus scientometric database using the keywords "modeling of heterostructures" and "modeling of heterostructure formation" was carried out. For comparative analysis, articles were selected from a search in the article title, abstract, and keywords in 2,039 scientific papers over the past 20 years. The countries and scientific organizations of the authors, the availability of financial support for research, the publications themselves, as well as the most popular and most cited editions in which the publication was made, their number and affiliation to the field of knowledge were analyzed.

The publications of authoritative world scientists in the field of heterostructure modeling were analyzed in order to understand the patterns of support and development of this direction in the world and in Ukraine, and to determine the prospects for new research. The peculiarities of international cooperation are considered, the circle of leading publications in the scientific field is outlined, and the factors of influence of scientists of different countries on the development of this field are analyzed. Proposals for improving the dissemination of the results of domestic scientists in the world scientific community in this direction have been formulated.

World scientists are trying to find practical application of the results of their research. Also, such directions are often determined by the available material base, developed software, or publications in collaboration between scientists from different countries, where each scientific group clearly performs its part of the work.

From an analysis of two searches of 2,039 and 166 scientific papers for the period 2002-2023, more than half of all papers were consistently published by scientists from the United States. Institutions that carry out advanced research on this topic are concentrated in leading research centers: CNRS Center National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University, etc.

Key words: *scientometric base, modeling, heterostructures, scientific research, fields of knowledge.*

Актуальність дослідження. Фізика двовимірних (2D) матеріалів і гетероструктур на основі таких кристалів розвивається надзвичайно швидко. З цими новими матеріалами почала з'являтися справжня двовимірна фізика. Відповідно, з'являються нові гетероструктурні пристрої, такі як тунельні транзистори, резонансні тунельні діоди та світловипромінювальні діоди.

Штучні гетероструктури Ван-дер-Ваальса з двовимірними (2D) атомними кристалами є перспективними як активний канал або як буферний контактний шар для пристроїв нового покоління. Проте справжні двовимірні гетероструктурні пристрої залишаються обмеженими через явище перенесення за участю домішок і формування метастабільної та неоднорідної гетероструктури. Підбір окремих двовимірних матеріалів у гетероструктури Ван-дер-Ваальса дає можливість створювати шаруваті тривимірні матеріали з бажаними електронними та оптичними властивостями. Основною проблемою у виготовленні цих структур є формування чистих границь між окремими двовимірними

матеріалами, що впливає на ефективність пристроїв.

Багато науковців у всьому світі вивчають проблеми моделювання гетероструктур, як вказано у великій кількості публікацій у наукометричних базах даних, таких як Scopus. Це свідчить про високу актуальність цього напрямку досліджень. Однак, обмежена кількість наукових публікацій від українських вчених вказує на необхідність поширення та розвитку цієї області в українських наукових установах. Українські вчені мають потенціал та можуть активно внести свій внесок у дослідження гетероструктур та моделювання цих процесів. Популяризація та підтримка цього перспективного наукового напрямку в Україні може сприяти розвитку наукового співтовариства та залученню нових дослідників до цієї галузі.

Мета дослідження. Виконати аналіз досліджень, які стосуються моделювання процесів формування гетероструктур, зробити спробу визначити особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку цього напрямку в Україні.

Таблиця 1

Провідні країни за кількістю публікацій у назві статті (Article title), анотації (Abstract) і ключових словах (Keywords) у напрямках досліджень

“microstructures for optoelectronic technology”	“nanostructures for optoelectronic technology”	“germanium microstructures and nanostructures”
China 71 United States 21 Germany 14 Taiwan 11 Japan 6 Spain 6 United Kingdom 6 India 5 Poland 5 Ukraine 3	United States 131 China 98 India 40 Germany 36 Japan 27 Italy 26 France 24 South Korea 23 United Kingdom 20 Ukraine 3	China 22 United States 12 Germany 10 India 5 France 3 Hong Kong 3 Japan 3 South Korea 3 Spain 2

Викладення основного матеріалу. Станом на січень 2023 р. у наукометричній БД Scopus за період 1987–2023 рр. опубліковано 176 наукових праць, пов’язаних з моделюванням формування гетероструктур, але значно більша їх кількість (2 427) у загальнішому запиті – моделювання гетероструктур. Це робить коректним і доцільним саме порівняльний аналіз за двома запитом (більш загального і уточненого). Високі сумарні h-індекси (h = 94 і 28) і щорічне (а з 2010 р. особливо різке) зростання кількості публікацій, лише підтверджує велику зацікавленість науковців до цих досліджень і особливо підвищений інтерес в останні роки.

Із аналізу за двома пошуковими запитом із 2 039 і 166 наукових праць за період 2002–2023 рр. більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими зі США (рис. 1, табл. 1). Серед країн-лідерів також є: Китай, Німеччина, Франція тощо. Значно важливіше знати не країни-лідери, а установи, де проводяться передові дослідження, щоб переймати досвід їхньої діяльності. Такі дослідження з даної тематики зосереджено у провідних науково-дослідних центрах, серед яких: *CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University* тощо. Саме ці організації займають лідируючі позиції з досліджень, присвячених моделюванню процесів формування гетероструктур, а отже, володіють високим науковим потенціалом і найкращими матеріально-технічними базами. Закономірно, що провідні центри належать саме країнам-лідерам, досвід яких українським науковцям слід вивчати і переймати, а організаціям налагоджувати тісні партнерські відносини.

Важливим аспектом для проведення досліджень є їх фінансова підтримка. Найбільшими світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю, США і країн ЄС: *National Science Foundation, National Natural Science Foundation of China, U.S. Department of Energy, Horizon 2020 Framework Programme, Basic Energy Sciences, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Office of Science* тощо. Майже усі ці організації, як і були, так і залишаються незмінними донині основними спонсорами досліджень. Тому для успішної реалізації досліджень українським науковцям слід шукати шляхи для їх фінансової підтримки саме серед цих потужних організацій. Як один із варіантів для українських вчених – виконання своїх досліджень або в закордонних центрах, які вже мають таку підтримку, вигравши певний дослідницький грант, або плідна співпраця української організації із закордонною.

У найбільш цитованих та одночасно найновіших публікаціях (з 2002 по 2023 роки) відображені найпрогресивніші та найактуальніші результати досліджень, пов’язаних із моделюванням формування гетероструктур. Автори (Cho, 2015) використовували індуковане лазером фазове моделювання та розробку полі морфів для створення омічного гетерофазного гомопереходу між напівпровідниковим гексагональним (2H) та металевим моноклінним (1T') дителуридом молібдену (MoTe₂). Цей матеріал є стабільним до температур, досягаючи 300°C, і підвищує рухливість носіїв заряду в транзисторах MoTe₂ приблизно в 50 разів, при цьому зберігаючи високий

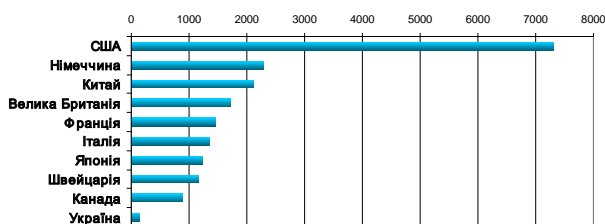


Рис. 1. Статистика країн із найбільшою кількістю публікацій

показник співвідношення струмів увімкнення/вимкнення, що складає 10^6 . Результати скануючої просвічуючої електронної мікроскопії в поєднанні з теоретичними розрахунками показали, що вакансія Te запускає локальний фазовий перехід у MoTe_2 , досягаючи справжнього 2D приладу з омичним контактом. У (Pizzocchero, 2016) представлено техніку швидкого пакетного виготовлення гетероструктур Ван-дер-Ваальса, продемонстровану контрольованим виробництвом моно-, дво- і тришарових графенових стеків, інкапсульованих у гексагональний нітрид бору, з виходом, близьким до 100 %. Для одношарових пристроїв виявлено напівкласичні середні вільні довжини до 0,9 мкм, причому найвужчі зразки демонстрували чіткі ознаки того, що на рухливість впливало граничне розсіювання. Авторами (Sahoo, 2018) був продемонстрований однобічний синтетичний підхід з використанням єдиного гетерогенного твердого джерела для безперервного виробництва бічних гетероструктур з кількома контактами, що складаються з моношарів дихалькогенідів перехідних металів. Послідовне утворення гетеропереходів досягалося виключно зміною складу реакційноздатного газового середовища в присутності водяної пари. Це дозволяло вибірково контролювати спричинене водою окислення та випаровування кожного попередника перехідного металу, а також його зародження на підкладці, що призводить до послідовної крайової епітаксії окремих дихалькогенідів перехідного металу. Даний новий підхід пропонує більшу гнучкість і контроль, ніж попередні методи, для безперервного зростання бічних гетероструктур на основі перехідних металів і дихалькогенідів.

У дослідженні (Shi, 2020) була представлена ефективна стратегія для значного уповільнення дифузії іонів у площині двовимірних галогідних перовскітів за допомогою включення жорстких π -спряжених органічних лігандів. У роботі були продемонстровані стійкі та регульовані бічні епітаксціальні гетероструктури, мультигетероструктури та надгратки. Використовуючи високороздільну просвічуючу електронну мікроскопію з корекцією аберацій низької дози, були показані практично атомно чіткі межі розділу та епітаксійний ріст.

Моделювання молекулярної динаміки підтвердило, що присутність спряжених лігандів призводить до зменшення розладу в гетероструктурі і збільшення енергії утворення вакансій у дво-

мірних перовскітах. Ці результати дають зрозуміти іммобілізацію та стабілізацію галогенідних перовскітних напівпровідників і демонструють матеріальну платформу для складних і молекулярно-тонких надграток, пристроїв та інтегральних схем. У статті (Romanov, 2011) представлено теоретичний аналіз поведінки дислокацій та релаксації напружень у семіполярній III-нітридній гетероепітаксії, наприклад, для шарів $\text{A}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ і $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$, вирощених на напівполярних площинах типу hh_2 - h - m або h_0 - h - m підкладок GaN. Показано, що напруження зсуву на унікальній похилій базальній (0001) площині не звертаються до нуля для таких геометрій росту. Це призводить до початку релаксаційних процесів у напівполярних III-нітридних гетероструктурах через ковзання дислокацій у базальних системах ковзання і до утворення дислокацій невідповідності (MD) з деякими векторами Бюргера на напівполярному гетероінтерфейсі. Результати моделювання обговорюються у світлі останніх експериментальних спостережень МН та нахилу кристалічної ґратки в семіполярних III-нітридних гетероепітаксціальних шарах.

Зокрема у найбільш цитованій з моделювання гетероструктур роботі (Novoselov, 2016) розглянуто властивості нових двовимірних кристалів і вивчено, як їхні властивості використовуються в нових гетероструктурних пристроях. Робота (Cao, 2018) присвячена вивченню гетероструктури, що складається з двошарового графену, в якому два шари графену закручені відносно один одного на певний кут. Експериментально підтверджено, що в приблизних до «магічного» кута кутах структура електронної зони навколо нульової енергії Фермі стає плоскою завдяки сильному міжшаровому зв'язку. Властивості двошарових графенових гетероструктур з внутрішньою закруткою на «магічний» кут вказують на можливість використання цих матеріалів для дослідження інших екзотичних квантових фаз багатьох тіл у двох вимірах без впливу магнітного поля. Доступність плоских зон через електричну настроюваність і настроюваність смуги пропускання через кут закручування може прокласти шлях до більш складних корельованих систем, таких як нетрадиційні надпровідники та квантові спінові рідини. Автори (Britnell, 2013) розширюють діапазон гетероструктур на основі 2D кристалів до фотоактивних за допомогою напівпровідникових дихалькогенідів перехідних металів (TMDC)/графенових стеків. Сингулярності

Ван Хоа в електронній щільності станів TMDC гарантують посилену взаємодію між світлом і речовиною, що призводить до посиленого поглинання фотонів і створення електронних дірок (які збираються в прозорих графенових електродах). Це дозволяє розробляти надзвичайно ефективні гнучкі фотоелектричні пристрої з фоточутливістю понад 0,1 А/Вт (що відповідає зовнішньому квантовому ККД понад 30%).

У роботі (Wang, 2013) автори досліджували контактну геометрію, в якій був металізований лише одновимірний край двовимірного графенового шару. Окрім вдосконаленої продуктивності порівняно зі звичайними поверхневими контактами, така геометрія крайового контакту дозволила повністю відокремити процеси збирання шарів і металізації контактів. У графенових гетероструктурах це призвело до високої електронної продуктивності, включаючи низькотемпературний балістичний транспорт на відстані більше 15 мікрметрів, і рухливості при кімнатній температурі, що порівнюється з теоретичною межею розсіювання фононів. Геометрія крайового контакту надало нові можливості для проектування багатшарових структур із комплементарних 2D-матеріалів. У (Bhimanapati, 2015) розглянуто значні останні досягнення та важливі нові розробки у 2D-матеріалах «за межами графену». Авторами було представлено концепцію теоретичного моделювання та розуміння сил Ван-дер-Ваальса, які утримують разом двовимірні шари в об'ємних твердих тілах. Крім того, вони досліджували екситонні властивості та морфологію росту цих матеріалів. Крім того, висвітлено нещодавні прориви в синтезі та характеристиках TMD і обговорено нові сімейства 2D-матеріалів, включаючи моноелементні 2D-матеріали (наприклад, силіцен, фосфорен тощо) і MXenes на основі карбиду та нітриду вуглецю перехідного металу. Також обговорено легування та функціоналізацію двовимірних матеріалів за межами графену, які дозволяють застосовувати пристрої, а потім прогрес у електронних, оптоелектронних і магнітних пристроях і теорії. Запропоновано також перспективи майбутнього двовимірних матеріалів за межами графену.

Важливим аспектом сучасних досліджень є формування наукових колективів, із підбором і залученням фахівців з різних галузей знань, для забезпечення комплексних результатів. Тому ціка-

вими і важливими є результати аналізу за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для світових публікацій, пов'язаних з моделюванням процесів формування гетероструктур, як за загальнішим, так і за уточненим запитом, переважаючими є галузі: «Фізика та астрономія», «Матеріалознавство», «Інженерія», «Хімія» (рис. 2, 3).

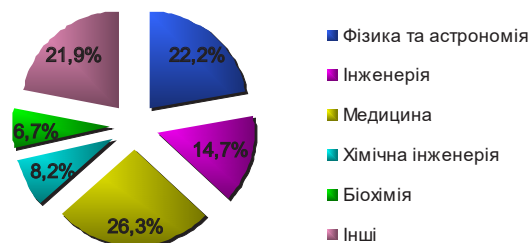


Рис. 2. Переважаючі галузі знань публікацій з моделювання процесів формування гетероструктур у світі

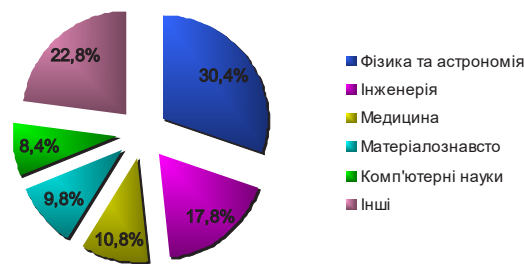


Рис. 3. Переважаючі галузі знань публікацій з моделювання процесів формування гетероструктур в Україні

Хоча загальна тенденція і зберігається незалежно від пошукового запиту – чітко виділені чотири галузі знань, однак, дещо вищі світові відсоткові значення кількості публікацій за більш загальним проти за уточненим запитом пов'язані з галуззю «Інженерія» (21,2 проти 16,2%). Тоді як для «Матеріалознавства» (24,3 проти 26,7%) і «Хімії» (7,2 проти 13,1%) ситуація протилежна та майже незмінна для галузі «Фізика та астрономія» (29,1 і 29,6%). Лідерство «Фізики та астрономії» вказує на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних областей фізики і перейшли у практичне русло, яке пов'язане з матеріалознавством, інженерією чи хімією. Також є очевидними, в залежності від виду запиту, незначні зміни пріоритетів у напрямках досліджень, а саме інтерес науковців комп'ютерних наук і біохімії.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз світових публікацій, що стосуються моделювання процесів формування гетероструктур і гетероструктурного моделювання, допомагає зрозуміти, які сучасні виклики важливі для науковців і які можливі шляхи подолання цих викликів.

Цей аналіз може виявити ключові напрямки досліджень та тенденції у галузі моделювання гетероструктур. Зрозуміння цих викликів і потенційних шляхів подолання може сприяти покращенню досліджень у цій області та сприяти розвитку нових методів та підходів.

Такий підхід до наукових досліджень і обмін інформацією є надзвичайно важливим для розвитку науки. Актуальні теми та виклики, які висвітлені у світових публікаціях, можуть стати цінним джерелом інсайтів для українських науковців, які працюють у цій області. Рациональне використання цієї інформації може сприяти розвитку наукових досліджень в Україні та співпраці зі світовими науковими спільнотами. Надіємося, що це сприятиме подальшому розвитку наукового потенціалу України та вирішенню важливих дослідницьких завдань на міжнародному рівні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Cho S., Kim S., Kim J.H., (...), Lee Y.H., Yang H. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe_2 . *Science*. 2015. Vol. 349. № 6248. P. 625–628.
2. Pizzocchero F., Gammelgaard L., Jessen B.S., et al. The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 11894.
3. Sahoo P.K., Memaran S., Xin Y., Balicas L., Gutiérrez H.R. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*. 2018. Vol. 553, № 7686. P. 63–67.
4. Shi E., Yuan B., Shiring S.B., et al. Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7805. P. 614–620.
5. Romanov A.E., Young E.C., Wu F., (...), Denbaars S.P., Speck J.S. Basal plane misfit dislocations and stress relaxation in III-nitride semipolar heteroepitaxy. *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109, № 10. 103522.
6. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016. Vol. 353, № 6298. aac9439.
7. Cao Y., Fatemi V., Demir A., (...), Ashoori R.C., Jarillo-Herrero P. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. Vol. 556, № 7699. P. 80–84.
8. Britnell L., Ribeiro R.M., Eckmann A., (...), Castro Neto A.H., Novoselov K.S. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films). *Science*. 2013. Vol. 340, № 6138. P. 1311–1314.
9. Wang L., Meric I., Huang P.Y., (...), Shepard K.L., Dean C.R. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6158. P. 614–617.
10. Bhimanapati G.R., Lin Z., Meunier V., (...), Terrones M., Robinson J.A. Recent Advances in Two-Dimensional Materials beyond Graphene. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9, № 12. P. 11509–11539.

REFERENCES:

1. Cho S., Kim S., Kim J.H., (...), Lee Y.H., Yang H. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe_2 . *Science*. 2015. Vol. 349. № 6248. P. 625–628.
2. Pizzocchero F., Gammelgaard L., Jessen B.S., et al. The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 11894.
3. Sahoo P.K., Memaran S., Xin Y., Balicas L., Gutiérrez H.R. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*. 2018. Vol. 553, № 7686. P. 63–67.
4. Shi E., Yuan B., Shiring S.B., et al. Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7805. P. 614–620.
5. Romanov A.E., Young E.C., Wu F., (...), Denbaars S.P., Speck J.S. Basal plane misfit dislocations and stress relaxation in III-nitride semipolar heteroepitaxy. *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109, № 10. 103522.
6. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016. Vol. 353, № 6298. aac9439.
7. Cao Y., Fatemi V., Demir A., (...), Ashoori R.C., Jarillo-Herrero P. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. Vol. 556, № 7699. P. 80–84.
8. Britnell L., Ribeiro R.M., Eckmann A., (...), Castro Neto A.H., Novoselov K.S. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films). *Science*. 2013. Vol. 340, № 6138. P. 1311–1314.
9. Wang L., Meric I., Huang P.Y., (...), Shepard K.L., Dean C.R. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6158. P. 614–617.
10. Bhimanapati G.R., Lin Z., Meunier V., (...), Terrones M., Robinson J.A. Recent Advances in Two-Dimensional Materials beyond Graphene. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9, № 12. P. 11509–11539.