doi: https://doi.org/10.15407/visn2025.04.053

ВОВК
Руслан Володимирович —
академік НАН України, декан фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

СТВОРЕННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ: СТАН, ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 19 лютого 2025 року

У доповіді обговорено результати міждисциплінарних наукових досліджень, спрямованих на розроблення та впровадження новітніх поліфункціональних наноматеріалів, потреба в яких неперервно зростає у світі. Отримані результати мають високу наукову і практичну значущість і є істотним внеском у розвиток високотехнологічних галузей промисловості, зокрема оборонної сфери, транспорту, енергетики. Наголошено на необхідності подолання розриву між рівнем експериментальних і теоретичних досліджень та масштабами практичного впровадження їхніх результатів.

Шановні колеги!

Ми з вами живемо в цікаві часи, коли на наших очах відбувається нова науково-технічна революція, яка характеризується бурхливим розвитком новітніх технологій XXI ст. — насамперед таких, як нанотехнології, інформаційні технології та біотехнології. Звісно, це сталося не миттєво, а було підготовлено довгими роками розвитку фундаментальних наук. При цьому вони взаємно доповнюють та збагачують одна одну.

Одним із найперспективніших напрямів розвитку науково-технічного прогресу людства в найближчому майбутньому є нанотехнології. Коротко нагадаю, що, згідно з міжнародним визначенням, *нанотехнології* — це сукупність методів, що забезпечують можливість контрольовано створювати і модифікувати об'єкти, що включають компоненти з розмірами, меншими за 100 нм (хоча б в одному вимірі), і внаслідок цього мають нові якості. Одне з найважливіших завдань, яке вирішують нанотехнології, — це створення наноматеріалів із заздалегідь заданими функціональними властивостями.

У свою чергу, *наноматеріали* — це практично будь-які об'єкти, речовини або їх композиції, розміри структурних елементів яких перебувають у «нанодіапазоні» (від 0,1 до 100 нм), а функціональні властивості визначаються нанорівнем їхньої структури.

Функціональні матеріали, як речовини або суміші речовин із заздалегідь заданими властивостями, у широкому розумінні є первинними предметами праці, які використовують для виготовлення виробів (основний матеріал) або які сприяють якимось діям. Ще кілька мільйонів років тому предки сучасної людини застосовували найдавніші функціональні матеріали, такі як камінь, кістка, деревина тощо, піддаючи їх механічній чи тепловій обробці.

Кілька тисяч років тому настала ера використання металів: міді, бронзи, заліза та ін., і вже тоді люди почали застосовувати перші нанотехнології. Звичайно, в стародавньому світі їх так не ідентифікували, а зараз називають «інтуїтивними» нанотехнологіями. До найбільш відомих виробів, виготовлених за допомогою таких технологій, належать мечі та шаблі, виготовлені з булату (дамаської сталі), давньоримський скляний кубок Лікурга (зараз він зберігається в колекції Британського музею), який змінює колір за різних умов освітлення: скло виглядає зеленим у прямому світлі і червоно-фіолетовим, коли світло просвічує крізь нього. Цей ефект пояснюється наявністю у склі наночастинок срібла, золота й міді. Подібну технологію використовували й для виготовлення середньовічних церковних вітражів. Свої «інтуїтивні» нанотехнології були також у давніх цивілізацій Латинської Америки: інків, мая, ацтеків та ін.

Однак справжній бурхливий розвиток нанотехнологій у сучасному розумінні цього слова розпочався в 70-х — 80-х роках XX ст., коли інтенсивно почала розвиватися сканувальна і силова мікроскопія.

Батьком нанотехнологій вважають американського фізика Річарда Фейнмана, який у 1959 р. першим висловив припущення про те, що невдовзі людство створюватиме матеріали шляхом модифікації їхньої структури на атомно-молекулярному рівні. А сам термін «нанотехнології» вперше використав японський учений Норіо Танігучі (Norio Taniguchi) у 1974 р. для опису процесів виготовлення нанометрових напівпровідникових структур.

У 1989 р. було продемонстровано перше практичне досягнення нанотехнологій: за допомогою сканувального тунельного мікроскопа, виготовленого фірмою IBM, американські дослідники Д. Ейглер і Е. Швейцер за 22 години виклали три літери логотипу компанії (IBM) із 35 атомів ксенону, послідовно переміщаючи їх. А вже у 2010 р. співробітники IBM, використовуючи техніку ультрашвидкої літографії, за допомогою атомно-силового мікроскопа створили з окремих атомів карту світу завширшки 2 мкм за 2 хв 23 с. Швидкість розвитку технологій просто вражає.

На сьогодні є два основні підходи до виготовлення наноматеріалів: «зверху вниз» (top-down) і «знизу вверх» (bottom-up). Метод «зверху вниз», який більш поширений в Україні, ґрунтується на послідовному зменшенні розмірів вихідних об'єктів завдяки використанню різних видів обробки, що дозволяє зрештою отримати кінцеві вироби з нанометровими розмірами. Метод «знизу вверх» полягає у створенні заданого виробу безпосередньо з атомів чи молекул, які розташовують у певному порядку з метою отримання заданої впорядкованої структури. При цьому підхід «знизу вверх», незважаючи на його технічну складність і вищу вартість, є більш перспективним з точки зору майбутнього розвитку нанотехнологій. А розвиваються вони дуже стрімко — кількість зареєстрованих у світі «нанопатентів» кожні наступні 10 років зростає більш як на порядок.

У 2015 р. наноіндустрія подолала знаковий рубіж — світовий обсяг інвестицій у цю галузь становив $1 трлн. Сфера застосувань нанотехнологій постійно розширюється — від космосу і оборонної галузі, інженерії, медицини, фармацевтики до товарів широкого вжитку.

Україна, хоча й не входить до числа країн-лідерів із розвитку нанотехнологій, задніх все ж ніколи не пасла. Зокрема, в структурі НАН України є ціла низка потужних наукових центрів з розвитку матеріалознавства і нанотехнологій. Зокрема, це Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів», Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Вєркіна,

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича та багато інших установ. З метою координації й підтримки робіт у сфері нанотехнологій Президія НАН України започаткувала у 2003 р. цільову комплексну програму фундаментальних досліджень «Наноструктурні системи, наноматеріали, нанотехнології», якою керував академік НАН України А.Г. Наумовець. На її завершальному етапі, у 2007—2009 рр., у програмі брали участь 40 академічних установ із восьми відділень НАН України, що дало змогу вирішити широке коло актуальних проблем і отримати низку вагомих наукових результатів. Однак, незважаючи на всі зусилля Академії, за останні десятиліття відставання України від світового мейнстриму в цій галузі помітно зросло. Про причини цього скажу дещо пізніше.

У Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна центри розвитку нанотехнологій і досліджень функціональних матеріалів зосереджені на фізичному, хімічному факультетах, факультеті радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, а також у Навчально-науковому інституті «Фізико-технічний факультет» і ННІ комп'ютерної фізики та енергетики.

За останні п'ять років співробітники фізичного факультету опублікували понад 1000 наукових статей у провідних світових спеціалізованих виданнях, а також книг, монографій та підручників як в Україні, так і за кордоном.

Із семи всесвітньо відомих наукових шкіл, які діють на фізичному факультеті, шість дотичні до тематики дослідження функціональних матеріалів, а саме:

- школа теоретичної фізики;
- школа фізики твердого тіла;
- школа фізики низьких температур;
- школа магнетизму;
- школа фізики реального кристала;
- школа фізичної оптики;
- школа фізики Сонячної системи.

У 2004 р. на фізичному факультеті було засновано ще одну наукову школу — з фізики наносистем і екстремального стану речовини, яка відтоді активно розвивається. Основними напрямами її наукових досліджень є:

- вивчення топологічних особливостей фізичних наносистем у конденсованих середовищах різної морфології, зокрема в умовах надпровідного і надплинного станів;
- розроблення і впровадження технологій нанофрезерування для створення і комплексного дослідження наноструктурованих флуксон-магнонних субстратів для досліджень у галузі спінтроніки і магноніки;
- використання високого тиску в синтезі методом електроконсолідації новітніх нанокомпозитних функціональних матеріалів різного призначення;
- розроблення і впровадження спеціальних методів моделювання наноструктур;
- синтез, дослідження та клінічне впровадження нових керамічних нанобіоматеріалів з високою біосумісністю і біоактивністю, які мають характеристики, близькі до характеристик природної кістки та зубної емалі;
- дослідження екстремального стану речовини, зокрема надпровідності й надплинності за низьких і наднизьких температур, а також впливу структурної і кінематичної анізотропії на еволюцію квазічастинкових збуджень у квантових середовищах різної морфології, в тому числі наноструктурованих.

Сьогодні наукова школа з фізики наносистем і екстремального стану речовини об'єднує понад 100 науковців, більш як 20 з яких захистили або підготували до захисту докторські та кандидатські дисертації, близько 80 наших випускників працюють нині в інших наукових центрах і понад 50 з них уже захистили свої дисертації. Ми тісно співпрацюємо з науковими колективами таких провідних світових наукових центрів, як Оксфорд, Кембридж, Імперіал-коледж, Національна лабораторія Ковентрі, з університетами міст Ексетер і Сент-Ендрюс (Велика Британія), Інститутом Макса Планка та Університетом Гете (Франкфурт-на-Майні, Німеччина), Університетом Відня (Австрія), Інститутом фізики твердого тіла «Демокрітос» (Афіни, Греція), Університетом Лісабону

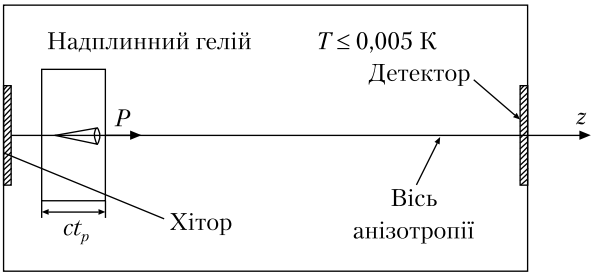

Рис. 1. Схема експериментів з вивчення анізотропних фононних підсистем

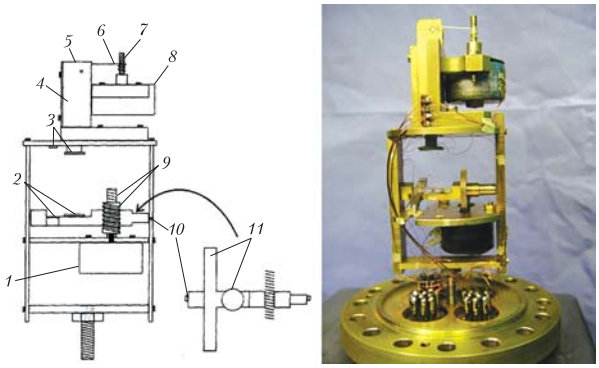

Рис. 2. Схематичне зображення і фото осередка з рухомими нагрівачами і нерухомими болометрами на скляній підкладці для вимірювання кутових залежностей енергії у фононному листі: *1* — нижній кроковий двигун; *2* — нагрівачі на сапфіровій підкладці; *3* — система рухомих і нерухомих болометрів; *4* — рухомий блок із вантажем; *5* — коловорот; *6* — котоновий привід; *7* — веретено; *8* — верхній кроковий двигун; *9* — черв'ячна передача; *10* — сталева вісь; *11* — система нагрівачів

та Інститутом Дона Афонсу III (Португалія), Університетом штату Мен (США), Університетом Нью-Брансвіка (Канада), Університетом П.Й. Шафарика (Кошице, Словаччина), Університетом А. Міцкевича (Познань, Польща).

Наносистеми, які ми вивчаємо:

1) надпровідні середовища різної морфології;

2) надплинні середовища, зокрема анізотропні квазічастинкові пучки в надплинному гелії;

3) флуксон-магнонні гетероструктури і метаматеріали;

4) нанокомпозитні матеріали;

5) нанобіоматеріали.

Дещо детальніше розповім про вивчення **надплинних наносистем**. У 2000-х роках мені пощастило працювати в Університеті Ексетера (Велика Британія) у всесвітньо відомій групі квантових рідин під керівництвом королівського академіка професора А.Ф.Дж. Віатта (A.F.G. Wyatt). За цикл робіт з цієї тематики, опублікованих у найпрестижніших світових фізичних виданнях, групу квантових рідин у 2004 р. було нагороджено спеціальною медаллю Європейського наукового співтовариства.

Професор Адріан Віатт працював у тісній колаборації з нашими фізиками-теоретиками, зокрема з групою Ігоря Миколайовича Адаменка, і у них постало питання: рідкий гелій — це функціональний матеріал чи ні? Відповідь однозначна — функціональний. У рідкій формі гелій практично не трапляється в природі, він є продуктом, виготовленим людиною в спеціальних умовах. Зараз рідкий гелій широко застосовують у таких напрямах науково-практичної діяльності:

- проведення наукових досліджень та експериментів;
- виробництво холодильних установок;
- високотехнологічне обладнання;
- кріогенні електричні машини;
- охолодження надпровідних магнітів у різних наукових, технічних та медичних пристроях, зокрема в сканерах МРТ, ЯМР-спектрометрах тощо;
- надплинна фаза гелію-4 є чудовим охолоджувачем для магнітів з високим полем, зокрема в прискорювачах заряджених частинок; обидва ізотопи гелію застосовують як детектори екзотичних частинок;
- використання в кріостатах розчинення.

Крім того, найновіше застосування гелію пов'язане з можливістю бездисипативного перенесення енергії та надшвидкої передачі інформації, що в близькій перспективі може бути використано для створення високошвидкісної та низькоенергетичної електроніки.

У період моєї роботи в групі професора Віатта ми вивчали анізотропні фононні пучки в надплинному гелії. Схему їх отримання наве-

дено на рис. 1. Ми також одержали результати з просторового розподілу енергії у фононному листі. Для цього було сконструйовано спеціальні пристрої з рухомими нагрівачами і нерухомими болометрами на скляній підкладці для вимірювання кутових залежностей енергії у фононному листі (рис. 2).

Основні результати за напрямом дослідження надплинності (див. деякі вибрані статті [1—5]) наведено нижче.

Уперше експериментально було показано, що кутовий розподіл пучка низькоенергетичних *l*-фононів, що генерується нагрівачем у надплинному гелії, має форму з площинним верхом, ширина якого збільшується зі зростанням потужності й довжини імпульсу.

Показано також, що площинний верх кутового розподілу виникає як наслідок утворення «гарячої плями» в центральному регіоні фононного листа і генерації в області цієї плями високоенергетичних *h*-фононів, які залишають центральний регіон *l*-фононного листа за постійної температури.

Уперше встановлено, що високоенергетичні фонони безперервно генеруються вздовж усієї траєкторії поширення низькоенергетичного фононного імпульсу в рідкому ^{4}He, а також уперше було показано, що з урахуванням дисперсії швидкостей високоенергетичних фононів, сигнал, який надходить на болометр у кожний момент часу, визначається їхнім енергетичним діапазоном. Крім того, вперше встановлено, що форма високоенергетичного фононного сигналу в разі коротких імпульсів добре описується в рамках передбачень теоретичної моделі Адаменка—Віатта.

Уперше зареєстровано ефект формування «гарячої лінії» (рис. 3), тобто області з підвищеною густиною енергії фононів, що виникає на перетині двох фононних листів у надплинному гелії, та встановлено закономірності реалізації її режиму в широкому кутовому і баричному діапазонах.

Уперше розроблено експериментальну технологію роздільного детектування високо- і низькоенергетичних фононів у надплинних квантових рідинах.

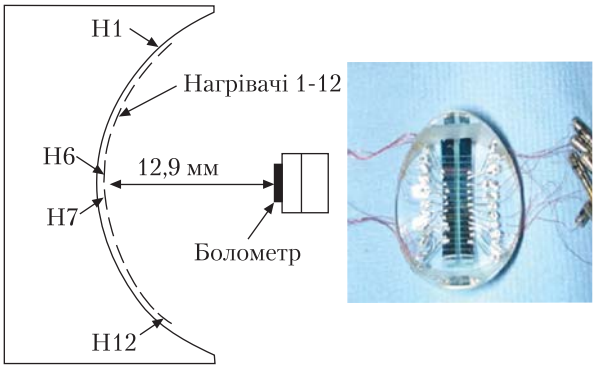

Рис. 3. Схема експерименту з вивчення «гарячої лінії» в рідкому ^{4}He і циліндрична лінза з 12-позиційною батареєю нагрівачів

Другий напрям наших досліджень, про який я хотів би сказати кілька слів, — це **флуксон-магнонні гетероструктури**. За цим напрямом ми тісно співпрацюємо з нашими колегами, які свого часу переїхали до Західної Європи і зараз працюють там на постійній основі. Ідеологічна й теоретична частина цих робіт повністю проведена нами, а реалізація — їхня, оскільки в Україні, на жаль, просто немає потрібного обладнання.

За браком часу я не буду зараз докладно зупинятися на описі цих досліджень, скажу лише, що ми першими у світі відкрили надпровідний магнонний кристал, а отримані результати було опубліковано в журналах групи Nature, що вже свідчить про їхню наукову вагомість і потенційну практичну значущість (див. окремі вибрані праці за цією тематикою [6—10]).

Наступний напрям наших досліджень — це **високотемпературна надпровідність** (ВТНП). Ми займаємося цією тематикою з моменту відкриття цього явища в 1986 р. На кафедрі фізики низьких температур фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна першими в Україні і одними з перших у світі ми розробили і реалізували технологію синтезу високодосконалих ВТНП-монокристалів. На рис. 4 показано морфологію поверхні одного з таких кристалів.

Ми також навчилися за допомогою лазера виготовляти спеціальні містки для резистив-

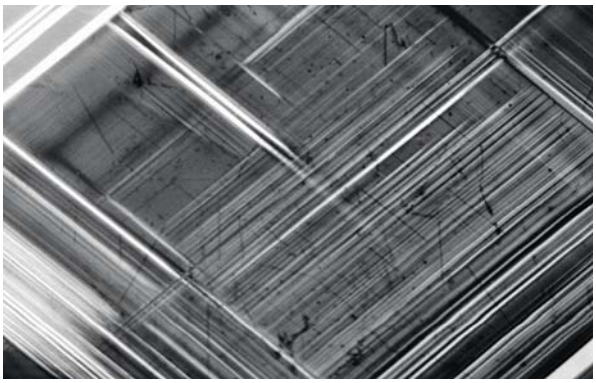

Рис. 4. Морфологія двійників монокристала $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, отримана методом оптичної мікроскопії на мікроскопі МІМ-7 у поляризованому світлі (×440)

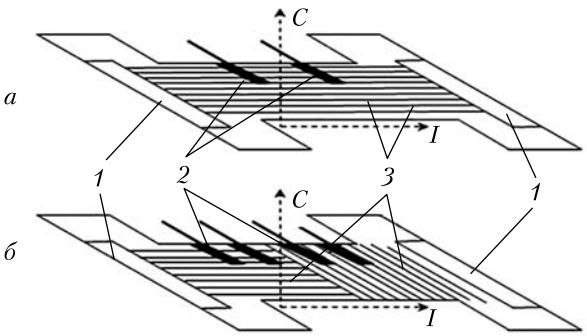

Рис. 5. Схематичне зображення містків для резистивних досліджень: *а* — вектор транспортного струму *I*, паралельний до площин двійникування; *б* — вектор транспортного струму *I*, паралельний і перпендикулярний до площин двійникування; *1* — струмові контакти; *2* — потенціальні контакти; *3* — межі двійників

них досліджень (рис. 5), модифікувати двійникові структури монокристалів, перетворювати за допомогою опромінення високоенергетичними електронами їхню мікроструктуру на наноструктуру, пригнічувати перехід порядок—безпорядок, що дозволяє керувати динамікою магнітного потоку, а це, як відомо, дуже важливо для практичного застосування високотемпературних надпровідників (рис. 6, рис. 7).

Встановлено фізичні закономірності реалізації у ВТНП-сполуках системи 1-2-3 (ReBaCuO і лантаноїди) псевдощілинної аномалії, флуктаційної парапровідності, некогерентного електротранспорту і переходів типу метал—ізолятор в умовах екстремальних зовнішніх впливів (високі тиск, температура, магнітні поля, опромінення), відхилення від стехіометрії та повної або часткової заміни складових.

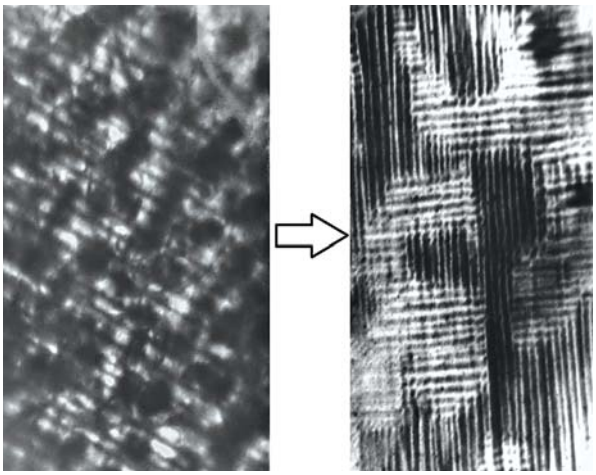

Рис. 6. Сегментація структури і зменшення міждвійникової відстані від 1—2 мкм до 20—40 нм ВТНП-монокристалів $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ після опромінення високоенергетичними електронами

Уперше відкрито наявність у ВТНП-сполуках явища висхідної дифузії та фізичної коалесценції.

Розроблено унікальну технологію синтезу високодосконалих монокристалів ВТНП і виготовлено експериментальні зразки із заданою топологією дефектного ансамблю.

Встановлено фізичні закономірності динаміки магнітного потоку та різних режимів динаміки вихрової матерії у ВТНП-сполуках в умовах структурної і кінематичної анізотропії.

Уперше експериментально підтверджено реалізацію у ВТНП-сполуках різного складу ефекту Фріделя і стрибкового механізму переносу заряду в одновимірному режимі.

За цим напрямом у нас опубліковано понад 200 статей (див., наприклад, деякі вибрані публікації [11—17]) і ми продовжуємо активно працювати за цією тематикою.

Тепер щодо напряму з дослідження і створення **нанокомпозитних матеріалів**. Ми виготовляємо їх методом електроконсолідації. Отримано нові нанокомпозитні матеріали для

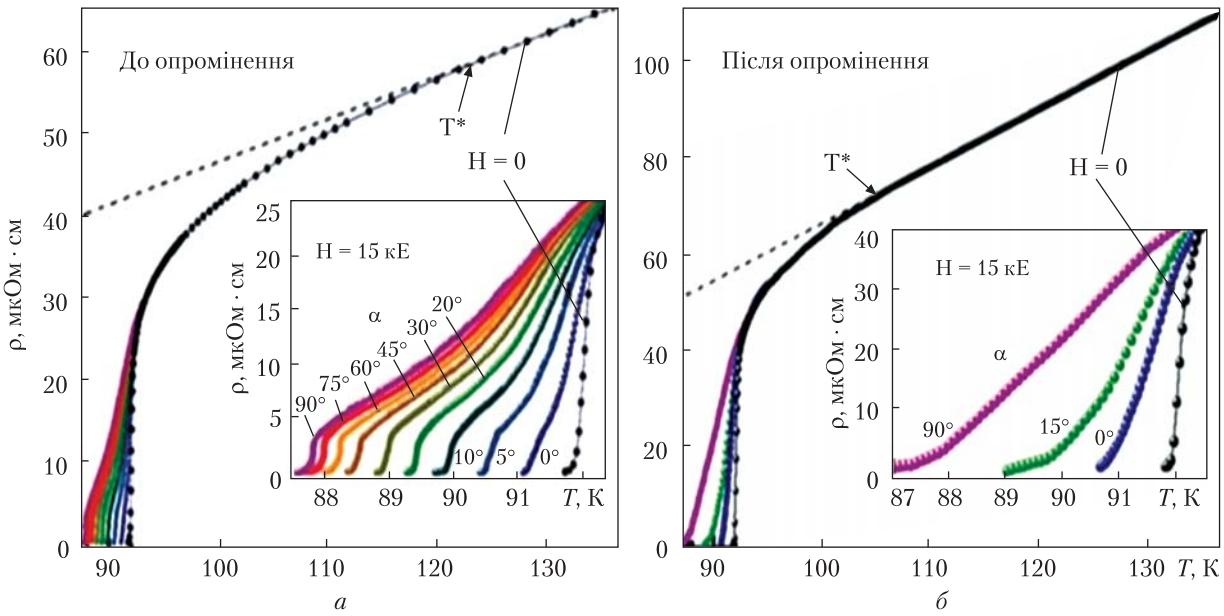

Рис. 7. Температурні залежності електроопору $\rho_{ab}(T)$ монокристала $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ до (*а*) і після (*б*) опромінення швидкими електронами для $H = 0$ і $H = 15$ кЕ, отримані за $\alpha \equiv \angle(\mathbf{H}, ab)$: 0; 5; 10; 20; 30; 45; 60; 75; 90° і 0; 15; 90° відповідно. Пунктирними лініями показано екстраполяцію лінійних ділянок на область низьких температур. Видно зникнення низькотемпературних сходинок на переходах, що свідчить про пригнічення переходу порядок—безпорядок у вихровій підсистемі

застосувань в оборонній галузі (див. вибрані статті за цим напрямом [18—22]). Зупинюся більш детально на створенні нанокомпозитів біомедичного призначення.

Так, на кафедрі фізики твердого тіла під керівництвом професора З.З. Зимана проводять дослідження з синтезу та клінічного впровадження нових керамічних біоматеріалів.

Синтезовано унікальні кальцій-фосфатні наноматеріали, які за складом, морфологією та структурою близькі до мінеральної складової твердої тканини хребетних — іонозаміщеного нестехіометричного фосфату кальцію на основі гідроксиапатиту (ГА). Ґрунтуючись на результатах досліджень фізичних процесів при синтезі та відпалі наноГА, створено керамічні біоматеріали з функціональними характеристиками, близькими до характеристик природної кістки та зубної емалі. Крім того, ми навчилися їх армувати за допомогою голкоподібних кристалів.

Нові нанобіоматеріали для відновлення тканин у кісткових дефектах показали високу біосумісність і біоактивність і здатні замінити пошкоджену кісткову тканину. Їх уже ефективно використовують для лікування кісткових уражень, зокрема отриманих унаслідок бойових дій, — у Державній установі «Інститут патології хребта та суглобів ім. професора М.І. Ситенка НАМН України» зроблено понад 450 успішних ортопедичних операцій. Післяопераційні дослідження засвідчили, що ці нові біоматеріали є високоефективними штучними замінниками та заповнювачами дефектів кісток і придатні для широкого клінічного застосування (рис. 8).

Зараз ми успішно рухаємося по шляху створення нового покоління кісткових імплантатів.

Як відомо, одним із найкращих у світі імплантатів вважають штучний сапфір. До речі, в Україні штучні сапфіри вирощують в НТК «Інститут монокристалів» НАН України, і, за деякими оцінками, у США більш як половину встановлених імплантатів такого типу виготовлено саме з українських сапфірів.

Однак сапфірові кісткові імплантати доволі високовартісні і малодоступні пересічному громадянину. В Україні з цією метою частіше

Рис. 8. Клінічна апробація керамічних кальцій-фосфатних біоматеріалів, розроблених на кафедрі фізики твердого тіла ХНУ імені В.Н. Каразіна для відновлення тканин у кістковому дефекті: *а* — кісткова пухлина; *б* — заповнення кісткового дефекту гранулами після видалення пухлини; *в* — утворення нової кісткової тканини в дефекті через 6 місяців після операції

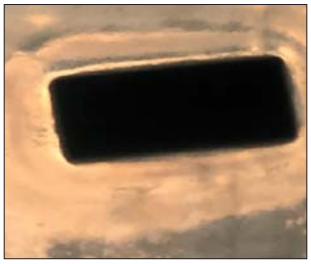

Рис. 9. Інкубація зразка кальцій-фосфатного покриття на поверхні MAX-фази Ti_3AlC_2 у товщі поживного середовища. Зона просвітлення навколо зразка свідчить про відсутність росту бактерій

використовують титан та його сплави, але, на жаль, титан має погану бактеріологічну резистентність, тобто на ньому селяться і розмножуються цілі колонії різних стафілококів та інших збудників, що спричиняє запалення, фіброз тканини, і згодом доводиться робити повторні операції.

Ми запропонували використовувати як основу для імплантата новий керамічний матеріал на основі MAX-фаз системи Ti_3AlC_2. Ця кераміка належить до класу потрійних тугоплавких сполук зі змінною стехіометрією, які описуються загальною формулою $M_{n+1}AX_n$, де M — 3*d*-перехідний метал, A — *p*-елемент (Si, Al та ін.), X — вуглець або азот. Такі матеріали мають унікальний комплекс властивостей, характерних як для металів, так і для кераміки.

Було розроблено два методи отримання нового керамічного матеріалу на основі супердисперсних порошків Ti–Al–C різного стехіометричного складу (MAX-фаз): метод гарячого пресування в умовах ізостатичного тиску за варіювання стехіометричного складу досліджуваних матеріалів та метод гарячого пресування з одночасним пропусканням змінного електричного струму (метод електроконсолідації). Як вихідні матеріали ми використовували ультрадисперсні порошки карбіду титану та алюмінію з різним молярним співвідношенням компонентів.

Потім ми розробили фізико-технологічні основи отримання біоінертних кальцій-фосфатних покриттів на поверхні досліджуваних зразків на основі MAX-фаз (рис. 9) і вперше створили кальцій-фосфатні покриття на підкладках Ti_3AlC_2 методом осадження з розчинів.

Проведені дослідження засвідчили, що запропонований новий керамічний матеріал за своїми властивостями та якістю значно перевершує традиційні матеріали для виготовлення ендопротезів та кісткових імплантатів на основі титану та його сплавів (див. деякі вибрані статті за цим напрямом [23—27]).

На завершення зупинюся на причинах відставання України від світового мейнстриму в розвитку нанотехнологій. Загалом вони зрозумілі й добре всім відомі. Перша причина — це, певна річ, війна: не може країна нормально працювати і розвиватися в умовах інтенсивних воєнних дій на її території. Друга причина традиційна — брак фінансування. Третя — застаріле обладнання. Четверта — постійний відплив фахівців за кордон.

Одним із виходів з такої ситуації може стати, на наш погляд, створення таких структурних підрозділів, які могли б забезпечувати свою діяльність за рахунок позабюджетних коштів і впроваджувати у виробництво нові технології, тобто комерціалізувати свої розробки. Такий гіпотетичний підрозділ (назвемо його Інститут прогресивних технологій) через міждисциплінарну співпрацю з профільними університетами, установами НАН України, медичними центрами, приватними компаніями (спільні лабораторії, дослідне виробництво тощо) міг би використати синергію точних, природничих наук, інженерії, грантового і комерційного фінансування і залучати до досліджень не лише фахівців, а й студентів. До речі, ми вже маємо позитивний досвід роботи створеної спільно з товариством Semiconductors Lab (м. Світловодськ) і медичними установами міжгалузевої лабораторії.

Власне, більшість країн Східної Європи, коли їм довелося перебудовуватися у зв'язку зі вступом до Євросоюзу, обрали саме такий шлях. І нам також варто починати рухатися в цьому напрямі, тим більше, що зараз ЄС виділяє більше коштів на підтримку саме української науки.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

REFERENCES

1. Vovk R.V., Williams C.D.H., Wyatt A.F.G. Angular distribution of a pulse of low energy phonons in liquid ^{4}He. *Phys. Rev. B.* 2003. **68**(13): 134508 (1-5). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.134508
2. Vovk R.V., Williams C.D.H., Wyatt A.F.G. Interactions between Sheets of Phonons in Liquid He-4. *Phys. Rev. Lett*. 2003. **91**(23): 235302 (1-4). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.235302
3. Vovk R.V., Williams C.D.H., Wyatt A.F.G. High-energy phonon pulses in liquid ^{4}He. *Phys. Rev. B*. 2004. **69**(14): 144524 (1-10). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.144524
4. Smith D.H.S., Vovk R.V., Williams C.D.H., Wyatt A.F.G. Pressure dependence of phonon interactions in Liquid ^{4}He. *Phys. Rev. B.* 2005. **72**(5): 054506 (1-7). https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.054506
5. Smith D.H.S., Vovk R.V., Williams C.D.H., Wyatt A.F.G. Interactions between phonon sheets in superfluid helium. *New Journal of Physics*. 2006. **8**(8): 128 (1-19). https://doi.org/10.1088/1367-2630/8/8/128
6. Dobrovolskiy O.V., Huth M., Shklovskij V.A., Vovk R.V. Mobile fluxons as coherent probes of periodic pinning in superconductors. *Sci. Rep*. 2017. **7**: 13740. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14232-z
7. Dobrovolskiy O.V., Sachser R., Huth M., Shklovskij V.A., Vovk R.V., Bevz V.M., Tsindlekht M.I. Radiofrequency generation by coherently moving fluxons. *Appl. Phys. Lett*. 2018. **112**: 152601. https://doi.org/10.1063/1.5028213
8. Dobrovolskiy O.V., Bevz V.M., Mikhailov M.Yu., Yuzephovich O.I., Shklovskij V.A., Vovk R.V., Tsindlekht M.I., Sachser R., Huth M. Microwave emission from superconducting vortices in Mo/Si superlattices. *Nature Communications*. 2018. **9**: 4927. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07256-0
9. Shklovskij V.A., Kruglyak V.V., Vovk R.V., Dobrovolskiy O.V. Role of magnons and the size effect in heat transport through an insulating ferromagnet/insulator interface. *Phys. Rev. B*. 2018. **98**: 224403. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.224403
10. Dobrovolskiy O.V., Sachser R., Brächer T., Fischer T., Kruglyak V.V., Vovk R.V., Shklovskij V.A., Huth M., Hillebrands B., Chumak A.V. Magnon-Fluxon interaction in a ferromagnet/superconductor heterostructure. *Nature Physics*. 2019. **15**: 477—482. https://doi.org/10.1038/s41567-019-0428-5
11. Bondarenko A.V., Shklovskij V.A., Obolenskii M.A., Vovk R.V., Prodan A.A. Resistivity investigations of plastic vortex creep in $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ crystals. *Phys. Rev. B*. 1998. **58**: 2445—2447. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.2445
12. Vovk R.V., Obolenskii M.A., Zavgorodniy A.A., Bondarenko A.V., Goulatis I.L., Samoilov A.V., Chroneos A.I. Effect of high pressure on the fluctuation conductivity and the charge transfer of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals. *J. Alloys and Compounds*. 2008. **453**: 69—74. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.11.169
13. Vovk R.V., Nazyrov Z.F., Obolenskii M.A., Goulatis I.L., Chroneos A., Pinto Simoes V.M. Phase separation in oxygen deficient $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals: effect of high pressure and twin boundaries. *Philosophical Magazine*. 2011. **91**(17): 2291—2302. https://doi.org/10.1080/14786435.2011.552893
14. Vovk R.V., Vovk N.R., Shekhovtsov O.V., Goulatis I.L., Chroneos A. C-axis hopping conductivity in heavily Pr-doped YBCO single crystals. *Supercond. Sci. Technol*. 2013. **26**(8): 085017. https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/8/085017

15. Solovyov A.L., Omelchenko L.V., Stepanov V.B., Vovk R.V., Habermeier H.-U., Przyslupski P., Rogacki K. Specific temperature dependence of pseudogap in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ nanolayers. *Phys. Rev. B.* 2016. **94**: 224505. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.224505
16. Solovjov A.L., Omelchenko L.V., Petrenko E.V., Vovk R.V., Khotkevych V.V., Chroneos A. Peculiarities of pseudogap in $Y_{0.95}Pr_{0.05}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals under pressure up to 1.7 GPa. *Sci. Rep*. 2019. **9**: 20424. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55959-1
17. Khadzhai G.Ya., Goulatis I., Chroneos A., Kislitsa M.V., Kamchatna S.M., Feher A., Vovk R.V. The effect of medium doses electron irradiation on the scattering of charge carriers in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystal. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron*. 2024. **35**: 1152. https://doi.org/10.1007/s10854-024-12867-z
18. Kuganathan N., Iyngaran P., Vovk R., Chroneos A. Defects, dopants and Mg diffusion in $MgTiO_3$. *Sci. Rep*. 2019. **9**: 4394. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40878-y
19. Gevorkyan E.S., Nerubatskyi V.P., Vovk R.V., Chyshkala V.O., Kislitsa M.V. Structure Formation in Silicon Carbide–Alumina Composites during Electroconsolidation. *Journal of Superhard Materials*. 2022. **44**(5): 339—349. https://doi.org/10.3103/S1063457622050033
20. Gevorkyan E.S., Nerubatskyi V.P., Vovk R.V., Chyshkala V.O., Morozova O.M., Latosińska J.N. Features of Synthesis of $Y_2Ti_2O_7$ Ceramics for the Purpose of Obtaining Dispersion-Strengthened Steels. *Acta Physica Polonica A*. 2022. **142**(4): 529—538. https://doi.org/0.12693/APhysPolA.142.529
21. Hevorkian E.S., Nerubatskyi V.P., Vovk R.V., Szumiata T., Latosińska J.N. Foamy ceramic filters and new possibilities of their applications. *Ceramics International*. 2024. **50**(4): 6961—6968. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.046
22. Ivzhenko V.V., Vovk R.V., Hevorkian E.S., Kosenchuk T.O., Chishkala V.O., Chernyavsky V.V., Shamsutdinova N.O. Investigation of electrospark sintering of composites of SIC—TIC, SIC—VC systems. *Materials*. 2025. **18**(3): 508. https://doi.org/10.3390/ma18030508
23. Gevorkyan E.S., Nerubatskyi V.P., Vovk R.V., Morozova O.M., Chyshkala V.O., Gutsalenko Yu.G. Revealing thermomechanical properties of Al_2O_3-C-SiC composites at sintering. *Functional Materials*. 2022. **29**(2): 193—201. https://doi.org/10.15407/fm29.02.193
24. Nerubatskyi V.P., Gevorkyan E.S., Vovk R.V., Krzysiak Z., Nazyrov Z.F., Morozova O.M., Hordiienko D.A. Peculiarities of obtaining nanocomposites with organic additives and consolidated nanomaterials with given properties. *Low Temperature Physics*. 2023. **49**(11): 1283—1288. https://doi.org/10.1063/10.0021375
25. Nerubatskyi V.P., Vovk R.V., Gzik-Szumiata M., Gevorkyan E.S. Investigation of the effect of silicon carbide nanoadditives on the structure and properties of microfine corundum during electroconsolidation. *Low Temperature Physics*. 2023. **49**(4): 498—504. https://doi.org/10.1063/10.0017596
26. Vovk R.V., Sokol K.I. Electric characteristics of calcium-phosphate ceramics with impurities. *Low Temperature Physics*. 2023. **49**(4): 457—460. https://doi.org/10.1063/10.0017589
27. Grib A., Khadzhai G., Petrushenko S., Dukarov S., Kislitsa M., Prikhna T., Serbenyuk T., Samsonik A., Sukhov V., Vovk R. The Electrical Resistivity of Multiphase Systems Based on the Ti_3AlC_2 Hexagonal Phase at Low Temperatures. *Physica Status Solidi B: Basic Research*. 2023. **260**(2): 2200298. https://doi.org/10.1002/pssb.202200298

Ruslan V. Vovk
V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9008-6252

CREATION OF MULTIFUNCTIONAL NANOMATERIALS: STATUS, PROBLEMS AND PROSPECTS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 19, 2025

The report discusses the results of interdisciplinary scientific research aimed at the development and implementation of new multifunctional nanomaterials, the need for which is constantly growing in the world. The results obtained have high scientific and practical significance and make a significant contribution to the development of high-tech industries, in particular the defense sector, transport, and energy. The need to bridge the gap between the level of experimental and theoretical research and the scale of their practical implementation is emphasized.

Cite this article: Vovk R.V. Creation of multifunctional nanomaterials: status, problems and prospects. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr*. 2025. (4): 53—62. https://doi.org/10.15407/visn2025.04.053