

PACS numbers: 01.52.+r, 07.85.Jy, 61.05.cc, 61.05.cf, 61.05.cp, 61.72.Dd, 81.07.Dc

Нові фізичні уявлення щодо природи прояву недосконалостей структури матеріалів у картині багатократного розсіяння випромінювання та перспективи їх використання

В. Б. Молодкін, В. Ю. Сторіжко, В. В. Лізунов, С. В. Лізунова,
М. Г. Толмачов, Л. М. Скапа, К. В. Фузік, В. В. Молодкін,
О. С. Скакунова, Б. В. Шелудченко, С. В. Дмитрієв, Є. В. Кочелаб,
Р. В. Лехняк

**Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03680, МСП, Київ-142, Україна*

Наведено квантово-механічну інтерпретацію деяких класичних фізичних явищ (дифракції, заломлення, поглинання, екстинкції та ін.), а також механізмів впливу недосконалостей структури досліджуваних об'єктів на ці явища з метою істотного поглиблення розуміння їхньої природи і більш ефективного використання їх при створенні новітніх функціональних можливостей у діагностиці об'єктів, як наноіндустрії, так і медицини.

Дана квантово-механическая интерпретация некоторых классических физических явлений (дифракции, преломления, поглощения, экстинкции и др.), а также механизмов влияния несовершенств структуры исследуемых объектов на эти явления с целью существенного углубления понимания их природы и более эффективного использования их при создании новейших функциональных возможностей в диагностике объектов, как наноиндустрии, так и медицины.

The quantum-mechanical interpretation of both some classical physical phenomena (diffraction, refraction, absorption, extinction, etc.) and mechanisms of the effects of structural imperfections of objects at issue on these phenomena is presented. This substantially extends understanding of their nature and contributes to efficient use of them for a creation of new functional capabilities in diagnostics of the nanotechnology and medicine objects.

Ключові слова: недосконалості структури, динамічна дифракція, дисперсійний механізм.

Ключевые слова: несовершенства структуры, динамическая дифракция, дисперсионный механизм.

Keywords: imperfections of structure, dynamic diffraction, dispersion mechanism.

(Отримано 21 березня 2015 р.)

Все почалося ще тоді, коли людина вперше зрозуміла, що «всі тіла складаються із корпускул, які знаходяться у постійному русі». І людині захотілося на власні очі побачити ці молекули і атоми. Однак у своїй більшості тіла виявилися непрозорими для видимого світла, а атомові розміри настільки малими, що обмежені можливості людського зору принципово ніяк не уможливили людині це зробити. Так у людства виникла перша проблема, пов'язана з потребою радикального поліпшення можливостей «зору» людини. А друга така проблема назріла тоді, коли людина, як і у випадку всіх інших непрозорих тіл, не змогла спостерігати внутрішні структурні зміни при хворобах і використовувати це для медичної діагностики та лікування. Обидві ці проблеми були розв'язані тільки після того як І. П. Пуллой і В. К. Рентген відкрили промені, що просвічують непрозорі тіла (1895 р.). Ці промені тепер називають Рентгеновими або Х-променями.

Як же людина за допомогою Рентгенових променів зуміла розв'язати дві вказані проблеми? Для цього їй знадобилися знання і використання двох явищ природи, одне з яких — це дифракція, а друге — поглинання, і ось з якої причини.

Якщо світловий промінь пробивається крізь отвір (щілину), розміри якого набагато більші за довжину хвилі променя, в неосвітлену область, то він розповсюджується в однорідному просторі прямолінійно (за законами геометричної оптики), поки не потрапить на екран і не освітить на ньому лише одну пляму, яка зображує цю щілину, а решта екрану залишиться темною. Якщо ж характерні розміри щілини або перешкоди, що встановлюється на шляху променя, порівнянні з довжиною світлової хвилі, то будуть проявлятися хвильові властивості світла (або заряджених частинок і нейтронів), а саме, спостерігатись явище дифракції.

Важливим спектральним приладом, дія якого базується на явищі дифракції, є дифракційна ґратниця (періодична у координатному просторі структура з періодом достатньо малим для того, аби могли проявитись хвильові властивості падного на неї світла). Дифракційна картина, одержана на такій періодичній структурі, поставленій на шляху променя, матиме вигляд ґратниці світлих плям в області тіні на екрані. Це відбувається з тієї причини, що в цьому випадку появи періодичної неоднорідности простору промінь перестає зберігати своє прямолінійне поширення у заданому напрямку (змінює свій імпульс) та починає розпо-

всюджуватись одночасно у декількох дискретних напрямках, які встановлюються формулою, одержаною двома вченими — Г. В. Вульфом і У. Л. Бреґгом. Періодична дискретність простору призводить до можливості відповідної дискретної зміни імпульсу частинок, тобто заміни його квазіімпульсом, а у однорідному просторі імпульс зберігається.

В результаті на екрані в області тіні спостерігається відразу ціла множина таких дифракційних плям, зображень щілини, віддалі між якими обернено пропорційні періоду ґратниці в координатному просторі. Часто координатний простір називають прямим простором, а простір напрямків і швидкостей розповсюдження (імпульсів) називають оберненим простором; крім того, дифракційну картину на екрані назвали зображенням оберненої ґратниці. Чим менший період прямої періодичної ґратниці кристалів і, відповідно, чим важче її побачити, тим більше при її просвічуванні збільшується період оберненої (дифракційної) ґратниці і тим легше побачити її зображення в оберненому просторі з урахуванням виникаючої можливості відсувати екран на достатню для цього віддаль (Й. Фраунгофер). Так, явище дифракції уможливило колосально збільшити зображення атомової ґратниці кристалів у просторі оберненої ґратниці, причому достатньо для створення можливості спостереження її безпосередньо людським оком і цим створити класичну кристалографію.

Рентгенографія медичних об'єктів, де дифракція на ґратниці (за її відсутністю) неможлива, стала здійсненою не тільки завдяки можливості проходження Рентгенових променів крізь непрозорі об'єкти, але при цьому і різному їх поглинанню в областях з різною густиною. Кістки, наприклад, поглинають сильніше завдяки присутності в них великої кількості кальцію, який сильно поглинає Рентгенові промені. На цьому ось вже більше ста років базується медична діагностика некристалічних об'єктів, в яких класична дифракція відсутня. Незначні відмінності коефіцієнтів поглинання онкологічних новоутворень та здорової тканини уможливають, використовуючи поглинання, виявляти ці новоутворення і за відсутності дифракції, але, на жаль, лише тоді, коли їх розміри вже перевищують 0,5 см та лікування онкології при цьому часто стає неможливим.

В свою чергу також виявилось, що властивості нових розроблюваних матеріалів визначаються не стільки структурою і параметрами їх ідеальних періодичних кристалічних ґратниць, скільки статистичними (середніми) характеристиками наведених в них прецизійною інженерією на атомовому рівні сучасними технологіями недосконалостей періодичної структури (дефектів і субструктури), для вивчення яких класична кристалографія виявилася непридатною.

Вирішення цих знову виниклих (чергових) проблем у діагностиці (в можливостях покращення «зору» людини) виявилось також можливим, але лише завдяки тому, що у 50-х–60-х роках ХХ-го століття в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України випускниками Київського національного університету імені Тараса Шевченка М. О. Кривоглазом [1, 2] та В. Б. Молодкіним [3–10] було вперше побудовано для реальних (недосконалих) кристалів з дефектами довільного типу пріоритетні у світі статистичні теорії розсіяння відповідно кінематичного (лінійного за малим параметром теорії збурень) наближення однократного і строгого динамічного (з урахуванням всього ряду теорії збурень і, як наслідок, всіх нелінійних ефектів багатократності розсіяння) як Бреґґового (яке було й у ідеально періодичних кристалах, однак тепер стає залежним від спотворень, так як обумовлене періодичною в «середньому» по спотворенням частиною потенціалу), так і вперше виникаючого лише в кристалах зі спотвореннями (відхилами від середньої періодичності) та обумовленого саме цими недосконаlostями дифузного розсіяння (дифракції на флюктуаційних періодичних Кривоглазових хвилях). Ці теорії і сьогодні є основою діагностики недосконалостей структури як конструкційних полікристалічних (кінематична), так і функціональних монокристалічних (динамічна) матеріалів у всіх провідних лабораторіях і наукових центрах світу.

Проведена нещодавно В. Б. Молодкіним та його співробітниками [11–32] в рамках квантово-механічного розгляду детальна порівняльна аналіза діагностичних можливостей кінематичної та динамічної картин розсіяння і фізичної природи (першопричини) спостережуваних їхніх радикальних відмінностей уможливила відкрити ними раніше невідоме фізичне явище дисперсійного (за рахунок ефектів заломлення) підвищення на багато порядків величини, у порівнянні з кінематичним випадком, показників чутливості та інформативності діагностики недосконалостей структури кристалів при багатократному розсіянні. Так, при квантово-механічному розгляді в кінематичному випадку здійснюють Фур'є-розвинення потенціалу (сприйнятливості) кристалу, тобто представлення його у вигляді суми відомих періодичних функцій (пласких з періодом усередненого за розподілом дефектів кристалу та флюктуаційних з довільним періодом хвиль) з невідомими коефіцієнтами (амплітудами, які можуть бути знайдені за формулами Фур'є, що і є переходом до імпульсного представлення шляхом так званого спектрального розкладу). Це уможливорює при розв'язанні у кінематичному наближенні Шрединґерових (або Максвеллових) рівнянь описати процес формування саме амплітуд пласких хвиль, у вигляді суми яких також шукається розв'язок (в імпульсному представленні) і для хвильової функції,

що описує картину розсіяння. При цьому характер Фур'є-спектру для хвильової функції повністю повторює спектральний Фур'є-розвинення потенціалу (збереження імпульсу при розсіянні), який і формує (задає) безпосередньо амплітуди пласкохвильового представлення хвильової функції (з цієї причини і названий авторами [20, 21] амплітудним механізмом проявлення структури), що і є створеною ними квантово-механічною моделлю формування відомого з оптики явища дифракції. Крім того, важливо, що при кінематичному пружньому розсіянні енергії станів, що описуються хвильовою функцією, зберігаючись, також зберігають закон дисперсії і, отже, модулі хвильових векторів, а змінюватися можуть лише їх напрямки за рахунок розсіяння на потенціалі, що забезпечує вказані особливості реалізації одночасного виконання законів збереження енергії та імпульсу.

Таким чином, показано, що лінійне наближення однократного розсіяння, покладене в основу традиційного і на сьогодні кінематичного розгляду, уможливило врахувати тільки описаний вище амплітудний механізм впливу недосконалостей структури на картину розсіяння, який забезпечив можливість одержання збільшеного Фур'є-зображення безпосередньо структури кристалу за рахунок Бреґґового (на періодичній складовій) та дифузного (на відхилах від періодичности (у «середньому»), які також представлені спектром періодичних з довільним періодом флюктуаційних хвиль) дифракційних розсіянь. Однак при врахуванні нелінійних процесів багатократного розсіяння (тобто всього ряду теорії збурень, як для амплітуди, так і для модуля хвильового вектора (коефіцієнта заломлення) хвильової функції) з'являється можливість, як недавно було показано авторами [20–32], врахувати та описати у рамках квантово-механічного розгляду, крім дифракції і поглинання, ще і явище заломлення променів, яке, як встановлено, обумовлене саме багатократністю розсіяння, а також явище екстинкції. Вперше також реалізовано [20–32] можливість врахування і використання механізму впливу на ці явища (а точніше, на коефіцієнт заломлення, на закон дисперсії, на модуль хвильового вектора та на коефіцієнт екстинкції за рахунок розсіяння на недосконалостях структури) характеристик недосконалостей структури. Це й зумовлює можливість врахування відкритого дисперсійного механізму на порядки величини підсиленого прояву недосконалостей структури в картині багатократного розсіяння, який виявився [20–32] не лише принципово більш ефективним, але і керованим умовами дифракції, що уможливило також вирішити проблеми багатопараметричної діагностики.

Крім того, на цій основі авторами створено також новий квантово-механічний теоретичний модель дисперсійного формування

зображень медико-біологічних об'єктів довільної форми за рахунок не лише поглинання, а також і вперше врахованого обумовленого заломленням нового механізму, а саме рефракції заломленого випромінювання в об'єкті і подальшого селективного за кутом рефракції дифракційного відбивання променів в аналізаторі, що забезпечує підвищення в тисячі разів чутливості медичної діагностики і досягнення якісно нового рівня інформативності зображень та цим вирішує проблему діагностики та терапії ранніх стадій новоутворень.

Проводяться роботи [14] з врахування ефектів заломлення та інших ефектів багатократності для метод дифузного малокутового розсіяння (дифузної дифрактометрії), як у кристалічних, так і в некристалічних об'єктах наноіндустрії та медицини.

Таким чином, за рахунок створення нових принципів і уявлень, а саме взаємоузгодженого врахування внесків і взаємовпливу всіх трьох явищ (дифракції, поглинання та вперше явища заломлення випромінювання) при формуванні чутливості картини розсіяння до недосконалостей структури об'єктів вдалося досягти революційного покращення можливостей Рентгенової діагностики, збільшивши на кілька порядків величини її чутливість і вирішивши проблему багатопараметричності, як для об'єктів наноіндустрії, так і для медицини [20–32]. Крім того, додатково підвищені чутливість та інформативність діагностики врахуванням нелінійних ефектів більш високого порядку теорії збурень, що відкрито в Україні [3–10] та має світовий пріоритет і зумовлюється взаємним впливом багатократних Бреґґового і дифузного розсіянь, а також взаємоузгодженим впливом недосконалостей структури на дифракцію, заломлення, поглинання й екстинкцію. Принципово важливим нелінійним ефектом є вже відмічений ефект екстинкції за рахунок розсіяння на недосконалостях та неоднорідностях структури, аномального росту вкладу дифузної складової та інтерференційні поправки до дійсної та уявної частин коефіцієнту заломлення як Бреґґової, так і дифузної складових та ін. Цим підтверджено, що немає нічого більш практичного, ніж хороша теорія. При цьому слід відзначити, що мільярдні витрати на удосконалення експериментальної бази повністю нівелиюються застосуванням застарілих і неадекватних теоретичних основ діагностики.

Практична реалізація розроблених в Україні та захищених багатьма патентами новітніх метод діагностики та числових алгоритмів розв'язання задачі розсіяння із взаємоузгодженим врахуванням дифракції, поглинання, заломлення, екстинкції та впливу інструментальних факторів, що не має аналогів у світі, вперше здійснена в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України у кристалографічному центрі та дифрактометричному

комплексі нового покоління, що включений до переліку об'єктів національного надбання України, а також забезпечено використання цих метод і алгоритмів для досягнення нових можливостей при інтерпретації результатів діагностики в Інституті фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Інституті прикладної фізики НАН України, ННЦ «ХФТІ» НАН України, в Чернівецькому, Прикарпатському та Київському національних університетах.

Розроблені новітні методи з рекордними, що перевищують досягнуті у світі, показниками також склали основу створених ІМФ ім. Г. В. Курдюмова НАН України разом з ННЦ «ХФТІ» НАН України проєктів діагностичних станцій та джерела нового покоління Українського національного синхротронного центру науки, технології та охорони здоров'я.

Підтвердження можливості забезпечення радикального підвищення показників чутливості та інформативності діагностики шляхом застосування розроблених теоретичних моделей і новітніх метод також одержано в результаті спільних досліджень на синхротронах, де застосування розроблених метод найбільш ефективно, з науковцями Ок-Ріджської та Аргонської національних лабораторій США, фотонної фабрики КЕК (Цукуба, Японія), синхротронного центру НДЦ «КІ» (Росія) та ін.

Слід відзначити, що в останні десятиріччя склалася поширена серед більшості дослідників, однак помилкова з точки зору авторів даної статті, думка про недоцільність розвитку та використання теорії багатократного розсіяння (динамічної теорії) для дослідження недосконалостей структури кристалів, що і призвело до відсутності запиту на динамічну теорію ось уже протягом майже ста років. До такого хибного погляду підштовхували наступні факти. Адже кінематична теорія — це наближення однократного розсіяння або перше (Борнове) наближення теорії збурень, а динамічна — це багатократне розсіяння, тобто врахування наступних порядків за малим параметром теорії, який для електронної мікроскопії $\cong 10^{-4}$, для Рентгенових променів $\cong 10^{-5}$ – 10^{-6} , для нейтронів $\cong 10^{-7}$, тобто занадто малий, щоб можна було експериментально виявляти динамічні квадратичні за величинами спотворень структури кристалів, тобто ще більш малі, поправки в картині розсіяння. Крім того, на відміну від кінематичного динамічний розгляд призводить до занадто складних і громіздких формул.

З вказаних причин експериментатори замість спроб врахування та використання динамічних ефектів, в доцільності чого у них були великі сумніви, обмежилися в експерименті такими випадками, коли цими ефектами без сумніву можна було за рахунок того, що області когерентного розсіяння були набагато меншими

довжини екстинкції знехтувати і використовувати простий кінематичний модель. Однак, як показали результати цієї та інших вказаних вище робіт, головною перевагою картини багатократно розсіяння виявляється не стільки поява поправок більш високого порядку малости до єдиного при кінематичному розсіянні відкритого авторами роботи амплітудного механізму прояву недосконалостей структури в картині розсіяння, скільки виникнення зовсім іншого дисперсійного механізму прояву недосконалостей структури при радикальній перебудові за рахунок багатократності розсіяння нульового наближення для амплітуд. А саме, відмінності кінематичної та динамічної теорій виникають ще в першому наближенні теорії, коли в динамічній теорії нульове наближення для амплітуд сильних Бреґґових хвиль у збуреній задачі принципово не зводиться на відміну від кінематичної теорії до розв'язків задачі без збурень, а поправки при цім від збурень, які залежать від недосконалостей структури об'єкту дослідження, одержують вже в першому наближенні модуль хвильового вектора розсіяних хвиль, коефіцієнт заломлення, закон дисперсії, що і названо авторами дисперсійним механізмом, який на порядки підвищує чутливість та інформативність діагностики недосконалостей структури, як вже відмічалось вище, та в тому числі і для багатопараметричної діагностики об'єктів як нанотехнології, так і медицини.

Слід також відзначити і другу широко розповсюджену «помилку», яка полягає в тому, що для діагностики мікродефектів нібито доцільно використовувати рівняння Такаґі [33] та статистичну динамічну теорію Като [34]. Однак, в роботі Като взагалі не розглядаються кристали з дефектами, а розв'язується проблема статистичних усереднень за мозаїчністю кристалів. Ніяких формул, що пов'язують розподіл інтенсивності дифракції в просторі оберненої ґратниці або інтегральну інтенсивність розсіяння з характеристиками конкретних дефектів, на відміну від робіт [3–5], які до того ж вийшли суттєво раніше, теорія Като не дає. До цього ж теорія Като ґрунтується на розв'язанні рівнянь Такаґі, які справедливі лише для плавних полів зміщень, і з цієї причини взагалі незастосовні або недостатньо коректні кількісно для мікродефектів.

Для більш широкого впровадження в практику також і в країнах, які не мають синхротронних і потужних нейтронних джерел, та ефективного використання пріоритетних досягнень українських вчених і забезпечених ними при створенні на основі цих розробок кристалографічного центру і дифрактометричного комплексу нового покоління унікальних діагностичних можливостей доцільним та конче потрібним є наступне.

1. Створити міжнародну учбово-наукову лабораторію «Новіт-

ньої діагностики об'єктів живої і неживої природи» та цим забезпечити відповідне розширення використання кристалографічного центру та дифрактометричного комплексу нового покоління, що включений до переліку об'єктів національного надбання України, які вже працюють в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України та демонструють навіть при використанні традиційних джерел випромінювання новітні, радикально поліпшені функціональні можливості діагностики, що відсутні поки що, але потрібні у світі, як для кристалічних, так і для некристалічних об'єктів. Така можливість забезпечується тим, що новітня діагностика заснована на використанні та постійному подальшому розвитку створеної співробітниками, що пропонуються до складу майбутньої Лабораторії, теоретичного моделю, який взаємоузгоджено враховує відкриті ними як амплітудний, так і дисперсійний квантово-механічні механізми формування чутливості картини багатократного розсіяння до недосконалостей структури досліджуваних об'єктів. При цьому перший амплітудний механізм формується, як встановлено, за рахунок впливу структури на дифракцію випромінювання. Другий дисперсійний механізм описує вплив недосконалостей структури на заломлення, поглинання та екстинкцію багатократно розсіяного випромінювання, що саме і підвищує на порядки величини структурну чутливість та принципово інформативність діагностики, тобто створює її якісно нові функціональні можливості.

2. Забезпечити для студентів, зокрема, Київського національного університету імені Тараса Шевченка, викладання лекційних курсів і проведення лабораторних робіт з основ новітньої діагностики та участь студентів і викладачів у науковій роботі.

3. З метою розширення можливостей використання для більш складних і актуальних об'єктів медицини та наноіндустрії, а також з метою значного зменшення вартості в порівнянні з синхротронними джерелами і одночасного радикального поліпшення необхідних параметрів (яскравість, монохроматичність та ін.) в порівнянні з традиційними забезпечити використання джерел квазімонохроматичного Рентгенового випромінювання з рідких металів, що опромінюються пучками протонів або електронів, які розроблено в Інституті прикладної фізики НАН України, і за необхідністю додатково забезпечити можливість використання рентгеномікроскопічних зображень об'єктів.

4. Розглянути можливість забезпечення використання для виконання учбово-наукових завдань Лабораторії вже створених, як в Україні, так і за кордоном, сучасних високояскравих джерел випромінювання.

5. Розробити план більш широкого впровадження в практику новітніх можливостей діагностики об'єктів наноіндустрії та ме-

дицини.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. А. Кривоглаз, *Металлы, электроны, решётка* (Ред. В. Н. Гриднев) (Киев: Наукова думка: 1975), с. 355.
2. М. А. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
3. В. Б. Молодкин, Е. А. Тихонова, *Физ. мет. металловед.*, **24**, № 3: 385 (1967).
4. В. Б. Молодкин, *Физ. мет. металловед.*, **25**, № 3: 410 (1968).
5. В. Б. Молодкин, *Физ. мет. металловед.*, **27**, № 4: 582 (1969).
6. В. Б. Молодкин, *Металлофизика*, **2**, № 1: 3 (1980).
7. V. B. Molodkin, *Phys. Metals*, **3**: 615 (1981).
8. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **227**: 429 (2001).
9. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **231**: 199 (2002).
10. E. N. Kislovskii, S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, V. V. Nemoshkalenko, V. P. Krivitsky, E. G. Len, E. V. Pervak, G. E. Ice, and B. C. Larson, *phys. status solidi (b)*, **231**: 213 (2002).
11. V. B. Molodkin, M. V. Kovalchuk, A. P. Shpak, S. I. Olikhovskii, Ye. M. Kyslovskyy, A. I. Nizkova, E. G. Len, T. P. Vladimirova, E. S. Skakunova, V. V. Molodkin, G. E. Ice, R. I. Barabash, and I. M. Karnaukhov, *Diffuse Scattering and the Fundamental Properties of Materials* (Eds. R. I. Barabash, G. E. Ice, and P. E. A. Turchi) (New Jersey: Momentum Press: 2009), p. 391.
12. А. П. Шпак, М. В. Ковальчук, В. Б. Молодкин, Г. І. Низкова, І. В. Гинько, С. Й. Оліховський, С. М. Кисловський, Є. Г. Лень, А. О. Білоцька, К. В. Первак, В. В. Молодкин, *Спосіб багатопараметричної структурної діагностики монокристалів з декількома типами дефектів*, Патент України № 36075 (опубліковано 10 жовтня 2008 р.).
13. А. П. Шпак, М. В. Ковальчук, В. Б. Молодкин, В. Л. Носик, В. Ю. Сторіжко, Л. А. Булавін, І. М. Карнаухов, Р. І. Барабаш, Дж. Е. Айс, Г. І. Низкова, І. В. Гинько, С. Й. Оліховський, С. М. Кисловський, В. А. Татаренко, Є. Г. Лень, А. О. Білоцька, К. В. Первак, В. В. Молодкин, *Спосіб багатопараметричної структурної діагностики монокристалів з декількома типами дефектів*, Патент України № 89594 (опубліковано 10 лютого 2010 р.).
14. V. B. Molodkin, A. P. Shpak, M. V. Kovalchuk, V. F. Machulin, and V. L. Nosik, *Phys. Uspekhi*, **54**, No. 7: 661 (2011).
15. Л. И. Даценко, В. Б. Молодкин, М. Е. Осиновский, *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами* (Киев: Наукова думка: 1988).
16. V. V. Nemoshkalenko, V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, M. V. Kovalchuk, Yu. M. Litvinov, E. N. Kislovskii, and A. I. Nizkova, *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research A*, **308**, No. 1: 294 (1991).
17. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, T. P. Vladimirova, E. S. Skakunova, R. F. Seredenko, and B. V. Sheludchenko, *Phys. Rev. B*, **78**:

- 224109 (2008).
18. В. Б. Молодкин, М. В. Ковальчук, И. М. Карнаузов, В. Ф. Мачулин, В. Е. Сторижко, Э. Х. Мухамеджанов, А. И. Низкова, С. В. Лизунова, Е. Н. Кисловский, С. И. Олиховский, Б. В. Шелудченко, С. В. Дмитриев, Е. С. Скакунова, В. В. Молодкин, В. В. Лизунов, В. А. Бушуев, Р. Н. Кютт, Б. С. Карамурзов, А. А. Дышеков, Т. И. Оранова, Ю. П. Хапачев, *Основы динамической высокоразрешающей дифрактометрии функциональных материалов* (Нальчик: Кабардино-Балкарский университет: 2013).
 19. В. Б. Молодкин, М. В. Ковальчук, И. М. Карнаузов, В. Е. Сторижко, С. В. Лизунова, С. В. Дмитриев, А. И. Низкова, Е. Н. Кисловский, В. В. Молодкин, Е. В. Первак, А. А. Катасонов, В. В. Лизунов, Е. С. Скакунова, Б. С. Карамурзов, А. А. Дышеков, А. Н. Багов, Т. И. Оранова, Ю. П. Хапачев, *Основы интегральной многопараметрической диффузодинамической дифрактометрии* (Нальчик: Кабардино-Балкарский университет: 2013).
 20. В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачев, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, С. М. Бровчук, Л. Н. Скапа, Р. В. Лехняк, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 7: 857 (2014).
 21. В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачев, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, С. М. Бровчук, Л. Н. Скапа, Р. В. Лехняк, В. В. Молодкин, Е. В. Фузик, *Успехи физики металлов*, **15**, № 2: 55 (2014); <http://ufm.imp.kiev.ua/ru/abstract/v15/i02/055.html>.
 22. В. В. Лизунов, Е. В. Кочелаб, Е. С. Скакунова, Е. Г. Лень, В. Б. Молодкин, С. И. Олиховский, Н. Г. Толмачёв, Б. В. Шелудченко, С. В. Лизунова, Л. Н. Скапа, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **13**, № 1: 99 (2015).
 23. О. С. Скакунова, С. Й. Оліховський, В. Б. Молодкін, Є. Г. Лень, Є. М. Кисловський, О. В. Решетник, Т. П. Владімірова, Є. В. Кочелаб, В. В. Лізунов, С. В. Лізунова, В. Л. Маківська, М. Г. Толмачов, Л. М. Скапа, Я. В. Василик, К. В. Фузік, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 3: 409 (2015).
 24. Б. В. Шелудченко, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, С. И. Олиховский, Е. Н. Кисловский, А. Ю. Гаевский, В. В. Лизунов, А. И. Низкова, Т. П. Владимирова, В. В. Молодкин, Е. В. Фузик, А. В. Гошкодеря, А. А. Белоцкая, Г. О. Велиховский, А. А. Музыкаченко, Р. В. Лехняк, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 4: 559 (2014).
 25. Б. В. Шелудченко, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, М. В. Ковальчук, Э. Х. Мухамеджанов, В. А. Бушуев, Ю. П. Хапачев, В. Е. Сторижко, С. И. Олиховский, Е. Н. Кисловский, А. Ю. Гаевский, В. В. Лизунов, А. И. Низкова, Т. П. Владимирова, В. В. Молодкин, Е. В. Фузик, А. В. Гошкодеря, Я. В. Василик, А. А. Белоцкая, Г. О. Велиховский, А. А. Музыкаченко, Р. В. Лехняк, *Актуальные вопросы современного естествознания*, вып. 12: 32 (2014).
 26. В. В. Лизунов, В. Б. Молодкин, С. И. Олиховский, С. В. Лизунова, Н. Г. Толмачев, А. И. Низкова, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, Я. В. Василик, Т. Г. Сыч, Е. В. Фузик, Р. В. Лехняк, Л. Н. Скапа, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 2: 265 (2015).
 27. S. M. Brovchuk, V. B. Molodkin, A. I. Nizkova, I. I. Rudnytska, G. I. Grankina,

- V. V. Lizunov, S. V. Lizunova, B. V. Sheludchenko, E. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, I. N. Zabolotnyi, A. A. Katasonov, V. F. Zhuravlev, R. V. Lekhnyak, L. N. Skapa, and N. P. Irha, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 8: 1035 (2014).
28. В. В. Лизунов, С. М. Бровчук, А. И. Низкова, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Б. В. Шелудченко, А. И. Гранкина, И. И. Рудницкая, С. В. Дмитриев, Н. Г. Толмачев, Р. В. Лехняк, Л. Н. Скапа, Н. П. Ирха, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 9: 1271 (2014).
29. В. Б. Молодкин, В. В. Лизунов, Е. С. Скакунова, С. В. Дмитриев, Б. В. Шелудченко, С. М. Бровчук, Л. Н. Скапа, *Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине* (Киев: Академперіодика: 2014), с. 253.
30. В. В. Лизунов, С. М. Бровчук, А. И. Низкова, В. Б. Молодкин, С. В. Лизунова, Б. В. Шелудченко, А. И. Гранкина, И. И. Рудницкая, С. В. Дмитриев, Н. Г. Толмачев, Р. В. Лехняк, Л. Н. Скапа, Н. П. Ирха, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології*, **12**, № 3: 565 (2014).
31. В. В. Лизунов, Е. В. Кочелаб, Е. С. Скакунова, Е. Г. Лень, В. Б. Молодкин, С. И. Олиховский, Н. Г. Толмачёв, Б. В. Шелудченко, С. В. Лизунова, Л. Н. Скапа, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології*, **13**, № 2: 349 (2015).
32. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. S. Skakunova, E. G. Len, E. N. Kislovskii, O. V. Reshetnyk, T. P. Vladimirova, V. V. Lizunov, L. N. Skapa, S. V. Lizunova, K. V. Fuzik, M. G. Tolmachov, B. K. Ostafiychuk, V. M. Pylypiv, and O. Z. Garpul', *Металлофиз. новейшие технол.*, **37** (2015) (в печати).
33. S. Takagi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **26**: 1239 (1969).
34. N. Kato, *Acta Cryst. A*, **36**, No. 5: 763 (1980).

REFERENCES

1. M. A. Krivoglaz, *Metally, Elektry, Reshyotka* [Metals, Electrons, Lattice] (Ed. V. N. Gridnev) (Kiev: Naukova Dumka: 1975), p. 355 (in Russian).
2. M. A. Krivoglaz, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals* (Berlin: Springer: 1996).
3. V. B. Molodkin and E. A. Tikhonova, *Fiz. Met. Metalloved.*, **24**, No. 3: 385 (in Russian).
4. V. B. Molodkin, *Fiz. Met. Metalloved.*, **25**, No. 3: 410 (1968) (in Russian).
5. V. B. Molodkin, *Fiz. Met. Metalloved.*, **27**, No. 4: 582 (1969) (in Russian).
6. V. B. Molodkin, *Metallofizika*, **2**, No. 1: 3 (1980) (in Russian).
7. V. B. Molodkin, *Phys. Metals*, **3**: 615 (1981).
8. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **227**: 429 (2001).
9. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *phys. status solidi (b)*, **231**: 199 (2002).
10. E. N. Kislovskii, S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, V. V. Nemoshkalenko, V. P. Krivitsky, E. G. Len, E. V. Pervak, G. E. Ice, and B. C. Larson, *phys. status solidi (b)*, **231**: 213 (2002).
11. V. B. Molodkin, M. V. Kovalchuk, A. P. Shpak, S. I. Olikhovskii,

- Ye. M. Kyslovskyy, A. I. Nizkova, E. G. Len, T. P. Vladimirova, E. S. Skakunova, V. V. Molodkin, G. E. Ice, R. I. Barabash, and I. M. Karnaukhov, *Diffuse Scattering and the Fundamental Properties of Materials* (Eds. R. I. Barabash, G. E. Ice, and P. E. A. Turchi) (New Jersey: Momentum Press: 2009), p. 391.
12. A. P. Shpak, M. V. Koval'chuk, V. B. Molodkin, H. I. Nyzkova, I. V. Hyn'ko, S. J. Olikhovs'kyy, Ye. M. Kyslovs'kyy, Ye. G. Len', A. O. Bilots'ka, K. V. Pervak, and V. V. Molodkin, *Sposib Bahatoparmetrychnoyi Strukturnoyi Diagnostyky Monokrystaliv z Dekil'koma Typamy Defektiv* [Method of Multiparametric Structural Diagnostics of Single Crystals with Several Types of Defects], Patent of Ukraine No. 36075 (Published October 10, 2008) (in Ukrainian).
 13. A. P. Shpak, M. V. Koval'chuk, V. B. Molodkin, V. L. Nosyk, V. Yu. Storizhko, L. A. Bulavin, I. M. Karnaukhov, R. I. Barabash, G. E. Ice, H. I. Nyzkova, I. V. Hyn'ko, S. J. Olikhovs'kyy, Ye. M. Kyslovs'kyy, V. A. Tatarenko, Ye. G. Len', A. O. Bilots'ka, K. V. Pervak, and V. V. Molodkin, *Sposib Bahatoparmetrychnoyi Strukturnoyi Diagnostyky Monokrystaliv z Dekil'koma Typamy Defektiv* [Method of Multiparametric Structural Diagnostics of Single Crystals with Several Types of Defects], Patent of Ukraine No. 89594 (Published February 02, 2010) (in Ukrainian).
 14. V. B. Molodkin, A. P. Shpak, M. V. Kovalchuk, V. F. Machulin, and V. L. Nosik, *Phys. Uspekhi*, **54**, No. 7: 661 (2011).
 15. L. I. Datsenko, V. B. Molodkin, and M. E. Osinovskiy, *Dinamicheskoe Rasseyanie Rentgenovskikh Luchey Real'nymi Kristallami* [Dynamical X-Ray Scattering by Real Crystals] (Kiev: Naukova Dumka: 1988) (in Russian).
 16. V. V. Nemoshkalenko, V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, M. V. Kovalchuk, Yu. M. Litvinov, E. N. Kislovskii, and A. I. Nizkova, *Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research A*, **308**, No. 1: 294 (1991).
 17. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, T. P. Vladimirova, E. S. Skakunova, R. F. Seredenko, and B. V. Sheludchenko, *Phys. Rev. B*, **78**: 224109 (2008).
 18. V. B. Molodkin, M. V. Koval'chuk, I. M. Karnaukhov, V. F. Machulin, V. E. Storizhko, E. Kh. Mukhamedzhanov, A. I. Nizkova, S. V. Lizunova, E. N. Kislovskiy, S. I. Olikhovskiy, B. V. Sheludchenko, S. V. Dmitriev, E. S. Skakunova, V. V. Molodkin, V. V. Lizunov, V. A. Bushuev, R. N. Kyutt, B. S. Karamurzov, A. A. Dyshekov, T. I. Oranova, and Yu. P. Khapachev, *Osnovy Dinamicheskoy Vysokorazreshayushchey Difraktometrii Funktsional'nykh Materialov* [Fundamentals of Dynamical High-Resolution Diffractometry of Functional Materials] (Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy Universitet: 2013) (in Russian).
 19. V. B. Molodkin, M. V. Koval'chuk, I. M. Karnaukhov, V. E. Storizhko, S. V. Lizunova, S. V. Dmitriev, A. I. Nizkova, E. N. Kislovskii, V. V. Molodkin, E. V. Pervak, A. A. Katasonov, V. V. Lizunov, E. S. Skakunova, B. S. Karamurzov, A. A. Dyshekov, A. N. Bagov, T. I. Oranova, and Yu. P. Khapachev, *Osnovy Integral'noy Mnogoparmetrychnoy Difraktometrii* [Fundamentals of Integrated Multiparametric Diffuse-Dynamical Diffractometry] (Nal'chik: Kabardino-Balkarskiy Universitet: 2013) (in Russian).
 20. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, M. G. Tolmachyov,

- O. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, L. M. Skapa, R. V. Lekhnyak, and K. V. Fuzik, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 7: 857 (2014) (in Russian).
21. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, N. G. Tolmachev, O. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, L. M. Skapa, R. V. Lekhnyak, V. V. Molodkin, and K. V. Fuzik, *Uspehi Fiziki Metallov*, **15**, No. 2: 55 (2014) (in Russian).
 22. V. V. Lizunov, E. V. Kochelab, O. S. Skakunova, E. G. Len, V. B. Molodkin, S. J. Olikhovs'kyi, M. G. Tolmachov, B. V. Sheludchenko, S. V. Lizunova, and L. M. Skapa, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **13**, No. 1: 99 (2015) (in Russian).
 23. O. S. Skakunova, S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. G. Len, E. M. Kislovskii, O. V. Reshetnyk, T. P. Vladimirova, E. V. Kochelab, V. V. Lizunov, S. V. Lizunova, V. L. Makivs'ka, M. G. Tolmachov, L. M. Skapa, Ya. V. Vasylyk, and K. V. Fuzik, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 3: 409 (2015) (in Ukrainian).
 24. B. V. Sheludchenko, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, S. J. Olikhovskiy, Ye. M. Kyslovskiy, O. Yu. Gaevskiy, V. V. Lizunov, A. I. Nizkova, T. P. Vladimirova, V. V. Molodkin, K. V. Fuzyk, A. V. Goshkoderya, A. O. Bilotska, G. O. Velikhovskiy, A. A. Muzychenko, and R. V. Lekhnyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 4: 559 (2014) (in Russian).
 25. B. V. Sheludchenko, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, M. V. Koval'chuk, E. Kh. Mukhamedzhanov, V. A. Bushuev, Yu. P. Khapachev, V. E. Storizhko, S. I. Olikhovskiy, E. N. Kislovskiy, A. Yu. Gaevskiy, V. V. Lizunov, A. I. Nizkova, T. P. Vladimirova, V. V. Molodkin, E. V. Fuzik, A. A. Muzychenko, and R. V. Lekhnyak, *Aktual'nye Voprosy Sovremennogo Estestvoznaniya*, Iss. 12: 32 (2014) (in Russian).
 26. V. V. Lizunov, V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, S. V. Lizunova, N. G. Tolmachev, H. I. Nizkova, O. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, K. V. Fuzik, R. V. Lekhnyak, and L. M. Skapa, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 2: 265 (2015) (in Russian).
 27. S. M. Brovchuk, V. B. Molodkin, A. I. Nizkova, I. I. Rudnytska, G. I. Grankina, V. V. Lizunov, S. V. Lizunova, B. V. Sheludchenko, E. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, I. N. Zabolotnyi, A. A. Katasonov, B. F. Zhuravlev, R. V. Lekhnyak, L. N. Skapa, and N. P. Irha, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 8: 1035 (2014).
 28. V. V. Lizunov, S. M. Brovchuk, A. I. Nizkova, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, B. V. Sheludchenko, A. I. Grankina, I. I. Rudnytska, S. V. Dmitriev, M. G. Tolmachev, R. V. Lekhnyak, L. M. Skapa, and N. P. Irkha, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 9: 1271 (2014) (in Russian).
 29. V. B. Molodkin, V. V. Lizunov, E. S. Skakunova, S. V. Dmitriev, B. V. Sheludchenko, S. M. Brovchuk, and L. N. Skapa, *Nanorazmernye Sistemy i Nanomaterialy: Issledovaniya v Ukraine* [Nanoscale Systems and Nanomaterials: Research in Ukraine] (Kyiv: Akadempriodyka: 2014), p. 253 (in Russian).
 30. V. V. Lizunov, S. M. Brovchuk, A. I. Nizkova, V. B. Molodkin, S. V. Lizunova, B. V. Sheludchenko, A. I. Grankina, I. I. Rudnytska, S. V. Dmitriev, N. G. Tolmachev, R. V. Lekhnyak, L. M. Skapa, and N. P. Irkha, *Nanosistemi*,

- Nanomateriali, Nanotehnologii*, **12**, No. 3: 565 (2014) (in Russian).
31. V. V. Lizunov, E. V. Kochelab, O. S. Skakunova, E. G. Len, V. B. Molodkin, S. J. Olikhovs'kyi, M. G. Tolmachov, B. V. Sheludchenko, S. V. Lizunova, and L. M. Skapa, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **13**, No. 2: 349 (2015) (in Russian).
 32. V. B. Molodkin, S. J. Olikhovs'kyi, O. S. Skakunova, E. G. Len, E. M. Kislovs'kyi, O. V. Reshetnyk, T. P. Vladimirova, V. V. Lizunov, L. M. Skapa, S. V. Lizunova, K. V. Fuzik, M. G. Tolmachov, B. K. Ostafiychuk, V. M. Pylypiv, and O. Z. Garpul', *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37** (2015) (to be published) (in Ukrainian).
 33. S. Takagi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **26**: 1239 (1969).
 34. N. Kato, *Acta Cryst. A*, **36**, No. 5: 763 (1980).

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36, Acad. Vernadsky Blvd.,
UA-03680 Kyiv-142, Ukraine