



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **111437** (13) **C2**
(51) МПК

G03B 42/02 (2006.01)

G01N 23/083 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

| | |
|---|--|
| (21) Номер заявки: а 2015 01308 | (73) Власник(и): ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ІМ. Г.В. КУРДЮМОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, бул. Акад. Вернадського, 36, м. Київ-142, 03680 (UA), ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "СУПЕР-ДІАГНОСТИКА", бул. Акад. Вернадського, 36, м. Київ-142, 03680 (UA) |
| (22) Дата подання заявки: 17.02.2015 | (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2115943 C1, 20.07.1998 US 2004/069949 A1, 15.04.2004 US 2013/129038 A1, 23.05.2013 WO 2007/100823 A2, 07.09.2007 US 6493422 B2, 10.12.2002 US 6526121 B1, 25.02.2003 CN 103559686 A, 05.02.2014 US 2014/241632 A1, 28.08.2014 WO 2013/104966 A1, 18.07.2013 |
| (24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.04.2016 | |
| (41) Публікація відомостей про заявку: 25.11.2015, Бюл.№ 22 | |
| (46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.04.2016, Бюл.№ 8 | |
| (72) Винахідник(и): Патон Борис Євгенович (UA), Молодкін Вадим Борисович (UA), Карнаухов Іван Михайлович (UA), Неклюдов Іван Матвійович (UA), Сторіжко Володимир Юхимович (UA), Горбик Петро Петрович (UA), Низкова Ганна Іванівна (UA), Оліховський Степан Йосипович (UA), Гасвський Олександр Юлійович (UA), Лізунова Світлана Вячеславівна (UA), Шелудченко Борис Володимирович (UA), Лізунов Вячеслав Вячеславович (UA), Третяк Олег Васильович (UA), Репецький Станіслав Петрович (UA), Толмачов Микола Григорович (UA), Шевченко Анатолій Дмитрович (UA), Фузік Катерина Вячеславівна (UA), Молодкін Віталій Вадимович (UA), Веліховський Глеб Олегович (UA) | |

(54) СПОСІБ ФАЗОВОЇ РЕНТГЕНОГРАФІЇ НЕКРИСТАЛІЧНОГО ОБ'ЄКТА ДОВІЛЬНИХ ФОРМИ І РОЗМІРІВ

(57) Реферат:

Винахід належить до способів одержання рентгенівських зображень внутрішньої структури некристалічних об'єктів, зокрема медико-біологічних, та може використовуватись для їх діагностики, а також діагностики виробів для термоядерної енергетики. Розроблено спосіб фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів шляхом проведення виміру інструментальних факторів та розподілу у всіх кристалах характеристик спотворень, отримання та комбінованої обробки одержаних варіацією умов експерименту зображень об'єкта, розбиття об'єкта на колонки, за рахунок чого визначають характеристики об'єкта довільних форми і розмірів, включаючи мікронні.

UA 111437 C2

Винахід належить до способів одержання рентгенівських зображень внутрішньої структури некристалічних об'єктів, зокрема медико-біологічних, та може використовуватись для їх діагностики, а також діагностики виробів для термоядерної енергетики.

5 Завдяки такому ефекту динамічного розсіяння, як заломлення променів, існує ([1-10] можливість спостереження і значного підвищення чутливості зображень некристалічних об'єктів. При цьому визначальним виявляється той факт, що коефіцієнт заломлення променів на три порядки величини перевищує коефіцієнт їх поглинання. Це дозволяє збільшити чутливість до некристалічних слабопоглинаючих об'єктів у тисячу разів.

10 Однак вкрай малі кути заломлення, а також у більшості випадків відхилення променів після проходження об'єкта (десяті долі кутових секунд) ускладнюють можливість формування і виявлення їх внеску в зображення. З цієї причини неоднорідний просторово-кутовий розподіл рентгенівського випромінювання за об'єктом досліджується добре відомими методами лише високороздільної рентгенівської динамічної дифрактометрії за допомогою кристала-аналізатора. При цьому монохроматичне випромінювання, що падає на об'єкт, повинно мати

15 достатньо малу, також порядку часток кутових секунд, куту розбіжність, що забезпечується за рахунок динамічного відбивання від кристала-монохроматора.

Недоліком відомих способів є відсутність адекватної теоретичної основи, яка давала б аналітичні вирази, що дозволили б за параметрами зображень та результатами додаткових вимірювань визначати характеристики об'єкта та проводити діагностику.

20 Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, до способу, що заявляється, є "Способ фазовой рентгенографии объектов и устройство для его осуществления (варианты)" [9], що включає формування монохроматором слабозбіжного монохроматичного пучка, спрямування пучка на об'єкт, формування зображення об'єкта динамічним розсіянням в ньому пучка з подальшим брегівським динамічним його відбиванням від досконалого

25 монокрystalа-аналізатора.

Відомий спосіб має наступні недоліки. Не передбачено додаткові виміри у достатній для багатопараметричної діагностики кількості, зокрема, комбіновані виміри зображень об'єкта у різних експериментальних умовах, та відсутні теоретичні моделі, без яких не можуть бути адекватно встановлені необхідні характеристики об'єкта за параметрами його зображень, отриманими на основі використання рефракції та дифракційного підсилення заломлених променів, тобто не може бути здійснено діагностику на основі отриманих фазодисперсних зображень об'єкта. Крім того, проведений у [9] розгляд вимагає його узагальнення на випадки об'єктів довільної форми, а також обмежений випадками досконалих кристалів-аналізаторів. При цьому, використання у [9] рівнянь Такагі замість рівнянь Шредінгера або Максвела

30 принципово не дозволяє виконати необхідне узагальнення цих результатів на кристали з дефектами.

В основу винаходу поставлено задачу розробити спосіб фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів шляхом проведення виміру інструментальних факторів та розподілу у всіх кристалах характеристик спотворень, отримання та комбінованої обробки одержаних варіацією умов експерименту зображень об'єкта, розбиття об'єкта на колонки за рахунок чого визначають характеристики об'єкта довільних форми і розмірів, включаючи мікронні.

35 Слід врахувати, що реальні зображення об'єкта формуються за рахунок двох механізмів, адекватний контроль взаємозв'язку і відносних внесків яких можливий лише в рамках строго динамічних підходів при кількісній інтерпретації зображень, тобто при діагностиці. Так, перший механізм обумовлений впливом характеристик досліджуваного об'єкта, що встановлюються (його розташування, форми, розмірів і коефіцієнтів заломлення і поглинання) на формування і інтенсивність заломленого пучка рентгенівських променів (кут його відхилення після проходження об'єкта, його поглинання і сформовану фазу). Адекватний кількісний опис цього механізму можливий лише на основі моделі, що враховує ефекти багатократності розсіяння, до яких відноситься і саме заломлення [11], та шляхом відповідних додаткових вимірів, зокрема ефектів поглинання. Другий механізм є пов'язаним з суттєвим підсиленням або послабленням динамічного відбивання цього заломленого і відхиленого пучка кристалом-аналізатором у порівнянні з відбиванням основного потоку променів для забезпечення

45 спостереження контрасту. При цьому характеристики об'єкта зазвичай не є постійними вздовж перпендикулярної до напрямку пучка поверхні (екрана) і повинні вимірюватися від точки до точки, різним чином змінюючи внески кожного з цих двох механізмів. Це і обумовлює їх складно контрольований взаємозв'язок при формуванні зображень і необхідність кількісного розділення їх впливів для кожної точки екрана (x, y) , без якого нівелюється інформативність зображень, яка

60 забезпечується лише у випадку виділення і аналітичного опису з використанням вказаних вище

додаткових вимірів та розроблених моделей для об'єктів довільної форми внеску першого механізму.

В той же час у вже існуючих моделях не враховується і не може бути коректно враховано цей взаємозв'язок ще й через те, що для інтерпретації зображення при розгляді другого механізму використовується теорія динамічного розсіяння, проте, по-перше, лише в ідеальних кристалах, в припущенні, що монохроматор і аналізатор не містять спотворень, і, по-друге, ця теорія заснована на рівняннях Такагі і не може бути в принципі узагальнена на випадок кристалів з дефектами. Разом з тим ігнорування дефектної структури та її неоднорідності в монокристалах монохроматора і аналізатора (яка, зокрема, може виявитися необхідною для підсилення контрастності зображень) призводить до невірної інтерпретації зображення, призводячи до грубих кількісних і навіть якісних помилок.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів, що включає формування монохроматором слабкорозбіжного монохроматичного пучка у багатоосовій рентгенівській установці, спрямування пучка на об'єкт, формування зображення об'єкта динамічним розсіянням в ньому пучка з подальшим брегівським динамічним його відбиванням від досконалого монокристала-аналізатора, згідно з винаходом, вимірюють інструментальні фактори установки, здійснюють вимір розподілу характеристик спотворень у всіх кристалах методами динамічної дифрактометрії, отримують та комбіновано обробляють одержані варіацією умов експерименту додаткові зображення об'єкта, розбивають об'єкт на колонки вздовж напрямку променя (вісь z) і для кожних x і y з Δx і Δy мікронних розмірів характеризують колонку довжиною l_{xy} і кутами повороту у площині розсіяння (z, x) відносно напрямку променя нормалей до площин входу променя в колонку і виходу з неї відповідно α_1^{xy} і α_2^{xy} , визначають розподіл яскравості зображення об'єкта для кожних x і y , визначають кут відхилення (рефракції) променю після проходження ним об'єкта для заданих x і y , визначають з використанням додаткових зображень, інструментальних факторів, характеристик спотворень і розбиття на колонки характеристики об'єкта довільних форми і розмірів, включаючи мікронні. Використовують джерело квазімонохроматичного випромінювання на базі прецизійного низькоенергетичного прискорювача заряджених частинок, рідкометалевого конвертору та елементів фокусувальної рентгенівської оптики. Використовують джерело нейтронів. Додатково цілеспрямовано вводять в окремі кристали монохроматора і аналізатора крупні дефекти, макродеформації і/або формують в кристалах кінематично розсіюючі шари з розмірами цих дефектів і товщинами шарів, що перевищують довжину екстинкції.

Для реалізації способу, що пропонується, авторами було враховано наступні чинники.

1. Обґрунтування необхідності і створення теоретичної моделі і експериментальних методів на основі вимірювань повної інтегральної інтенсивності динамічної дифракції та практична реалізація кількісного врахування дифузної складової розсіяння, яка, як показано авторами [12, 13], аномально зростає при динамічному розсіянні, що обов'язково використовується в цих випадках, і на порядки величини може збільшувати відбивну здатність аналізатора (див. фіг. 1).

2. Забезпечення теоретичного та експериментального врахування і адекватного кількісного опису внеску також відкритого авторами [12, 13] явища дисперсійного колосального керованого умовами дифракції підсилення впливу дефектів на картину саме багатократного когерентного розсіяння (див. фіг. 2, 3).

3. Забезпечення можливості адекватної інтерпретації результатів рентгенівської діагностики вперше передбачається спосіб теоретичного та експериментального кількісного розділення внесків і врахування взаємозв'язку обох вищевказаних механізмів формування фазоконтрастних зображень за рахунок заломлення, заснований як на спеціальному вказаному вище додатковому контролі і подальшому усуненні паразитного впливу реальної структури кристалів, а також інших інструментальних факторів установок, так і на створенні теоретичних основ і засобів, які забезпечують можливість реалізації цього способу для некристалічних об'єктів довільної форми шляхом використання отриманих в [11, 14] аналітичних формул і моделей для опису як першого, так і другого механізмів окремо для кожної точки екрана (x, y) з використанням запропонованого авторами способу розбивання променю на мікропучки як теоретично, так і експериментально.

Таким чином, це дозволило запропонувати спосіб адекватної кількісної унікально чутливої і інформативної діагностики з використанням не лише поглинання, але і заломлення при отриманні висококонтрастних зображень, зокрема в медицині, вперше з попереднім детальним аналізом і врахуванням інструментальних факторів на основі використання створених авторами

[12, 13] моделей багатократного розсіяння в кристалах монохроматора і аналізатора з неоднорідно розподіленими макродеформаціями і мікродефектами, а також в біомедичних об'єктах довільної форми в умовах їх триосової динамічної діагностики [11, 14], що мають світовий пріоритет. При цьому важливе значення мають запропоновані експериментальне
 5 виділення внеску в зображення від поглинання і засоби, що забезпечують використання передбачених в рамках цих теорій вказаних вище нових явищ і ефектів при багатократному розсіянні та розроблених у результаті і запатентованих нових способів унікально чутливої діагностики недосконалостей у монохроматорі і аналізаторі. Крім того, у зв'язку з необхідністю визначення великої кількості характеристик об'єктів, тобто діагностики багатопараметричних систем, пропонується проводити додаткові операції, що забезпечують реалізацію і
 10 використання комбінованого підходу шляхом отримання багатьох додаткових зображень об'єкта за рахунок варіації умов експерименту (скільки невідомих характеристик - стільки рівнянь), зокрема за рахунок цілеспрямованої зміни довжини хвилі випромінення, геометрії дифракції (за Бреггом та Лауе), кута розорієнтації монохроматора і аналізатора, експериментального виділення внеску від поглинання додатково до повертань об'єкта навколо осей та отримання
 15 темнопольного зображення.

Запропонований спосіб пояснюється фіг. 1-6, а саме:

- фіг. 1 демонструє ефект аномально великого внеску дифузної складової, яка може на
 20 порядки величини змінити відбивну здатність монохроматора і аналізатора (їх криві відбивання), що суттєво змінює результати діагностики; експериментальні і теоретичні криві відбиття (відповідно маркери і суцільні лінії) для зразка CzSi, рефлекс 333, випромінення $\text{CuK}\alpha_1$; когерентна компонента і внески дифузного розсіяння від крупних і дрібних петель і сферичних преципітатів кисню позначені відповідно тонкою суцільною, штрих-пунктирною, пунктирною и штриховою лініями, на вставках показано центральні частини кривих
 25 дифракційного відбивання;

- фіг. 2 демонструє явище колосального підсилення прояву дефектів у картині динамічного розсіяння ($\mu_0 t = 1$, $\mu_0 t = 5$) у порівнянні з кінематичною картиною ($t = \Lambda / 7$); розподіли повної картини динамічного розсіяння при різних товщинах і для різних типів дефектів; випадок геометрії Лауе, рефлекс $\text{CuK}\alpha_1$ 220: а-в - кластери, (сферичні преципітати кисню у кремнії з
 30 $n_c = 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $R_0 = 0,1 \text{ мкм}$, $R_{\text{eff}} = 0,63 \text{ мкм}$, k_x , k_y - відхилення у площині розсіяння від вузла оберненої решітки в одиницях, обернених до міжплощинної відстані $d^{-1} \times 10^{-4}$, $L_H = 0,008$); г-е - дислокаційні петлі з орієнтаціями вектора Бюргерса $\langle 111 \rangle$ ($n_c = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $R_0 = 0,1 \text{ мкм}$, $R_{\text{eff}} = 0,63 \text{ мкм}$, $L_H = 0,12$, $\mu_{ds}(0) / \mu_0 = 0,25$); ж-і - ідеальний кристал;

- на фіг. 3 представлені результати кількісного розгляду явища колосального підсилення прояву дефектів у картині динамічного розсіяння; зміна характеру впливу дрібних і крупних дефектів при варіації умов Лауе-дифракції (товщини кристалу) на динамічну картину розсіяння (ТКД-профілі повної інтенсивності при $k_z = 0$) для кристалів Si (рефлекс (220), випромінення $\text{MoK}\alpha_1$): а) - кінематичний випадок, б) - динамічно "тонкий" і в) - динамічно "товстий" кристали; концентрації дислокаційних петель двох радіусів вибрано так, щоб середньоквадратичні
 40 зміщення атомів матриці були однакові ($L_H = 0,12$);

- на фіг. 4 представлено схему експерименту;

- фіг. 5 демонструє абсорбційне (б) та рефракційне зображення леей, одержані при поворотах аналізатора на половину півширини КДВ у бік зменшення (а) і збільшення (в) кутів відносно точного брегівського положення;

- на фіг. 6 представлено теоретичний розрахунок профілів інтенсивностей для зображень об'єкта відповідно у випадках а, б і в фіг. 6; суцільна лінія - з урахуванням поглинання, штрих-пунктирна - без його врахування.

Можна зробити висновок, що спотворення, які змінюють відбивну здатність кристалу у кінематичному випадку не більше, ніж на 10-20 %, при динамічній дифракції можуть на порядки величини збільшувати її в тонких кристалах, а в товстих в центрі кривої зменшувати, а на хвостах збільшувати, але також на порядки величини. Ці результати обумовлені конкуренцією колосального впливу трьох складових явища дисперсійного підсилення впливу дефектів на картину динамічного розсіяння: аномального внеску дифузної складової, дисперсійного підсилення впливу дефектів за рахунок фактору Кривоглаза-Дебая-Валлера на орієнтаційно-
 50

інтерференційні ефекти у відбивній та поглинальній здатностях періодичної складової кристалу, і екстинкції за рахунок дифузного розсіяння, що передбачені авторами [12, 13].

Запропонований спосіб реалізується наступним чином.

Приклад. Як один з варіантів реалізації запропонованого способу пропонується схема, представлена на фіг. 4, на якій два монокристали кремнію визначають хвильовий фронт рентгенівських променів і забезпечують високу кутову чутливість до заломлення. Кристал-монохроматор задає хвильовий фронт і колімує промінь, що падає на зразок. Аналізатор є вирізаним з того ж злитку монокристала кремнію і спрямовує плоскі хвилі, що пройшли через зразок, за рахунок дифракції на фотоплівку, диференціюючи яскравість променів залежно від кутів їх відхилення.

Дослідження проводились на рентгенівській установці УРТ-1, що пристосована для роботи в триосьовому режимі. Використовувалася рентгенівська трубка з молібденовим анодом потужністю 0,75 кВт, фотографічне зображення реєструвалося за допомогою рентгенівської плівки.

Випромінення з трубки, пройшовши через систему вертикальної і горизонтальної щілин шириною 0,5 мм і 3 мм, відповідно, встановлену на відстані 55 мм від фокуса рентгенівської трубки розміром 0,4 мм, прямувало на кремнієвий монохроматор з симетричним відбиттям (220). Виділене монохроматором $M\alpha K$ випромінення потрапляло на досліджуваний об'єкт, закріплений на підставці, яку можна переміщати перпендикулярно рентгенівському променю. Промінь, пройшовши крізь об'єкт, падав на кремнієвий аналізатор з симетричним трикратним (220) відбиттям. Для забезпечення комбінованого підходу аналізатор було повернуто в бік менших і більших кутів, при яких величина інтенсивності кривої дифракційного відбивання становила 50 % від її максимального значення.

Оскільки найбільше спотворення хвильового фронту [6] відбувається на межі середовищ, що мають округлу форму, а також вибираючи найбільш доцільні характеристики за коефіцієнтом заломлення, як об'єкт використовували рибальську ліску діаметром 0,45 мм.

На топограмах (фіг. 5) спостерігаються характерні чорно-білі абсорбційний (б) і рефракційні (а, в) контрасти, адекватні теоретичні профілі для яких представлені на фіг. 6.

Представлені профілі розподілу яскравості зображення об'єкта вздовж x не залежать від Y в розглянутому випадку спрямованої вздовж u циліндричної леси, а в загальному випадку для кожного u визначаються для трьох значень розорієнтації монохроматора і аналізатора $\Delta\theta_i$ ($\Delta\theta_1 = -\omega/2$, $\Delta\theta_2 = 0$ і $\Delta\theta_3 = \omega/2$, де ω - напівширина кривої відбиття аналізатора) за запропонованою авторами формулою:

$$R^y(x) = \int R_M^{xy}(\varphi) R_A^{xy}(\varphi - \Delta\theta_i - \varphi_x^y) R_{об}^{xy}(\varphi, \mu_x^y, l_x^y, \varphi_x^y) d\varphi,$$

де R_M^{xy} , R_A^{xy} і $R_{об}^{xy}$ - відбивні здатності для заданих x , Y відповідно монохроматора, аналізатора і об'єкта; $\mu_x^y, l_x^y, \varphi_x^y$ - відповідно коефіцієнт поглинання для об'єкта, товщина об'єкта, зміна фази променя і кут відхилення променя після проходження ним об'єкта для заданих x , Y .

При цьому для кута φ_x^y вперше отримано формулу

$$\varphi_x^y = \delta_x^y \frac{\sin(\alpha_1^{xy} + \alpha_2^{xy})}{\cos \alpha_1^{xy} \cos \alpha_2^{xy}},$$

де δ_x^y - коефіцієнт заломлення в зразка для заданих x , Y ; α_1^{xy} і α_2^{xy} - відповідно кути відхилення від напрямку променя, що падає, нормалей до поверхонь входу і виходу променя для заданих x , Y у площині розсіяння, тобто, при їх обертанні навколо осі u .

Слід зазначити, що вирази для R_M^{xy} , R_A^{xy} і $R_{об}^{xy}$ є отриманими і використовуються з урахуванням можливої наявності мікрodefektів та інших спотворень і неоднорідностей в монокристалах монохроматора і аналізатора, а також неоднорідностей об'єкта. При цьому для кожного x і Y при Δx і ΔY в межах мікронних розмірів об'єкт замінюється колонкою, орієнтованою паралельно променя (вздовж осі z), а поверхні входу променя в колонку і виходу

з неї замінюються площинами, орієнтованими паралельно осі Y і під кутами до осі x відповідно α_1^{xy} і α_2^{xy} .

На сьогодні ефективна реалізація способу фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів поки виявилася можливою головним чином тільки на джерелах синхротронного випромінення, недоступних при реалізації медичного використання цього методу для широких кіл населення. З цієї причини забезпечення масового впровадження даного методу та інших таких в медичну практику може стати можливим тільки за умови пропонуваного як невід'ємна частина даного патенту використання вітчизняних спеціалізованих компактних (включаючи і мобільний варіант) джерел рентгенівських променів на основі прискорювачів протонів або електронів [15, 16]. При цьому передбачається адаптація на цих джерелах модифікованого і автоматизованого методу фазоконтрастних зображень з урахуванням і поглинання, а також з використанням режиму рентгенівської мікроскопії, які доповнюють його в необхідних випадках. Це забезпечить можливість переобладнання на основі створених установок в перспективі всіх існуючих медичних рентгенівських кабінетів, необхідність якого

гостро наразі.
Для реалізації запропонованого способу на нейтронах використовуються дифрактометричні нейтронно-оптичні схеми, за рахунок чого стає можливим проведення діагностики об'єктів більших розмірів.

Додаткове цілеспрямоване введення в кристали монохроматора і аналізатора крупних дефектів, макродеформацій і/або формування в кристалах кінематично розсіюючих шарів збільшує яскравість отримуваних зображень.

Таким чином, запропонований спосіб фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів може стати ключовим у забезпеченні комплексу дій і заходів, які вирішують проблему медичної діагностики, а саме визначення характеристик (місця розташування, форми та розмірів) медико-біологічних об'єктів на основі використання отриманих зображень, адресної доставки у виявлені об'єкти нанокапсульованого гадолінію та інших лікарських препаратів [17-19], а також комплексної терапії нейтронозахватними та іншими методами.

Джерела інформації:

1. Forster E. Double Crystal Diffractometry for the Characterization of Targets for Laser Fusion Experiments / E. Forster, K. Goets, P. Zaumseil // Kristall und Technik. - 1980. - Vol. 15, No.8. - P. 937-945.
2. А.с. СССР № 140287 МПК G01N 23/08. Способ получения теневых картин внутренней структуры объекта с помощью проникающего излучения / Н.Л. Митрофанов, К.М. Подурец, В.А. Соменков, А.Б. Тюгин, Р.Р. Чистяков, С.Ш. Шильштейн (СССР); опубл. 15.06.88, бюл. № 22.
3. Соменков В.А. Рефракционный контраст в рентгеновской интроскопии / В.А. Соменков, А.К. Ткалич, С.Ш. Шильштейн // ЖТФ. - 1991. - Т. 61, № 11. - С. 197-201.
4. Патент РФ № 2012872 МПК G01N 23/02. Способ получения изображения внутренней структуры объекта / В.Н. Ингал, Е.А. Беляевская, В.П. Ефанов; опубл. 15.05.94.
5. Snigirev A. On the Possibilities of X-ray Phase Contrast Microimaging by Coherent High-energy Synchrotron Radiation / A. Snigirev, I. Snigireva, V. Kohn, S. Kuznetsov, I. Schelokov // Rev. Sci. Instrum. - 1996. - Vol. 66, No. 12. - P. 5486-5492.
6. Бушуев В.А. Динамическая теория формирования изображений некристаллических объектов в методе фазово-контрастной интроскопии / В.А. Бушуев, В.Н. Ингал, Е.А. Беляевская // Кристаллография. - 1996. - №5. - с. 808-816.
7. The Physics of Medical Imaging / [Ed. by Steve Webb]. - Philadelphia: CRC Press, 1988. - 633 p.
8. Подурец К.М. Радиогрaфия с рефракционным контрастом / К.М. Подурец, В.А. Соменков, С.Ш. Шильштейн // ЖТФ. - 1989. - Т. 59, № 6. - с. 115-121.
9. Патент РФ № 2115943, МПК G03B 42/00, G01N 23/00. Способ фазовой рентгенографии объектов и устройство для его осуществления (варианты) / Ингал В.Н., Беляевская Е.А., Бушуев В.А.; опубл. 20.07.98.
10. Ando M. Medical Applications of Synchrotron Radiation / M. Ando, C. Uyama. - Springer, 1998. - 200 p.
11. Теория многократного (динамического) рассеяния в некристаллических объектах / С.В. Лизунова, В.Б. Молодкин, Б.В. Шелудченко и др. // Металлофизика и новейшие технологии. - 2013. - Т. 35, № 11. - С. 1585-1593.

12. Основы интегральной многопараметрической диффузодинамической дифрактометрии / [В.Б. Молодкин, М.В. Ковальчук, И.М. Карнаухов и др.]. - Нальчик: Кабардино-Балкарский университет, 2013. - 120 с.

13. Основы динамической высокоразрешающей дифрактометрии функциональных материалов / [В.Б. Молодкин, М.В. Ковальчук, И.М. Карнаухов и др.]. - Нальчик: Кабардино-Балкарский университет, 2013. - 129 с.

14. Теоретическая трехосевая модель динамического рассеяния и формирования изображений некристаллических объектов / Б.В. Шелудченко, В.Б. Молодкин, С.В. Лизунова и др. // Металлофизика и новейшие технологии. - 2014. - Т. 36, № 4. - с. 561-575.

15. Патент України № 49031, МПК H05G 2/00, H01J 35/00. Джерело рентгенівського випромінювання / Сторіжко В.Ю., Ілляшенко М.В., Дрозденко О.О., Денисенко В.Л., Вершинський С.О.; опубл. 12.04.2010, бюл. № 7.

16. Патент України № 49032, МПК H05G 2/00, H01J 35/00. Спосіб генерації рентгенівського випромінювання / Сторіжко В.Е., Ілляшенко М.В., Дрозденко О.О., Денисенко В.Л., Вершинський С.О.; опубл. 12.04.2010, бюл. № 7.

17. Патент України № 99211, МПК A61K 45/06, A61K 39/44, A61K 47/02, A61K 9/51, A61P 35/00. Нанокapsула з функціями наноробота / Горбик ПП., Петрановська А.Л., Турелик М.П., Туранська С.П., Васильєва О.А., Чехун В.Ф., Лук'янова Н.Ю., Шпак А.П., Кордубан О.М.; опубл. 25.07.2012, бюл. № 14.

18. Патент України № 78473, МПК A61K 31/70, A61P 35/00. Магнітна протипухлинна рідина / Патон Б.Є., Горбик ПП., Петрановська А.Л., Турелик М.П., Абрамов М.В., Васильєва О.А., Чехун В.Ф., Лук'янова Н.Ю.; опубл. 25.03.2013, бюл. № 6.

19. Патент України № 91910, МПК A61K 49/00, A61K 51/00. Магніточутливий нейтронозахватний нанокomпозитний матеріал / Горбик ПП., Петрановська А.Л., Пилипчук Є.В., Абрамов М.В., Васильєва О.А., Молодкін В.Б., Куліш М.П., Дмитренко О.П.; опубл. 25.07.2014, бюл. № 14.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

1. Спосіб фазової рентгенографії некристалічного об'єкта довільних форми і розмірів, що включає формування монохроматором слаботорозбіжного монохроматичного пучка у багатоосовій рентгенівській установці, спрямування пучка на об'єкт, формування зображення об'єкта динамічним розсіянням в ньому пучка з подальшим бреггівським динамічним його відбиванням від досконалого монокристала-аналізатора, який **відрізняється** тим, що вимірюють інструментальні фактори установки, проводять вимір розподілу характеристик спотворень у всіх кристалах методами динамічної дифрактометрії, отримують та комбіновано обробляють одержані варіацією умов експерименту додаткові зображення об'єкта, розбивають об'єкт на колонки вздовж напрямку променя (вісь z) і для кожних x і y з Δx і Δy мікронних розмірів характеризують колонку довжиною l_y і кутами повороту у площині розсіяння (z,x) відносно напрямку променя нормалей до площин входу променя в колонку і виходу з неї відповідно α_1^{xy} і α_2^{xy} , визначають розподіл яскравості зображення об'єкта для кожних x і y за формулою:

$$R^y(x) = \int R_M^{xy}(\varphi) R_A^{xy}(\varphi - \Delta\theta_1 - \varphi_x^y) R_{об}^{xy}(\varphi, \varphi_x^y, \mu_x^y, l_x^y, \varphi_x^y) d\varphi,$$

де R_M^{xy} , R_A^{xy} і $R_{об}^{xy}$ - відбивні здатності для заданих x, y відповідно монохроматора, аналізатора і об'єкта, що використовуються з урахуванням можливої наявності мікроефектів та інших спотворень і неоднорідностей в монокристалах монохроматора і аналізатора, а також неоднорідностей об'єкта, μ_x^y , l_x^y , φ_x^y , φ_x^y - відповідно коефіцієнт поглинання для об'єкта, товщина об'єкта, зміна фази променя і кут відхилення (рефракції) променя після проходження ним об'єкта для заданих x, y,

а φ_x^y визначають за формулою:

$$\varphi_x^y = \delta_x^y \frac{\sin(\alpha_1^{xy} + \alpha_2^{xy})}{\cos \alpha_1^{xy} \cos \alpha_2^{xy}},$$

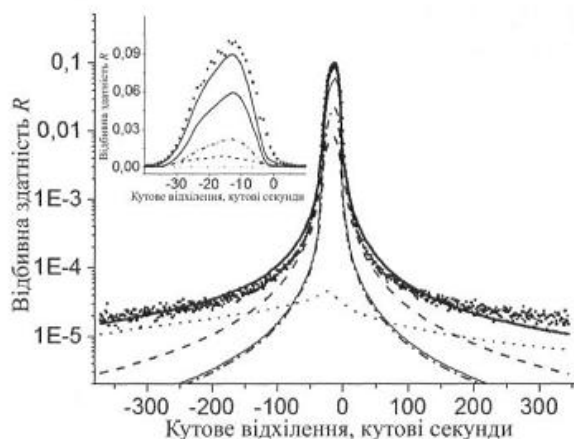
де δ_x^y - коефіцієнт заломлення в зразку для заданих x, y,

визначають з використанням додаткових зображень, інструментальних факторів, характеристик спотворень і розбиття на колонки характеристики об'єкта довільних форми і розмірів, включаючи мікронні.

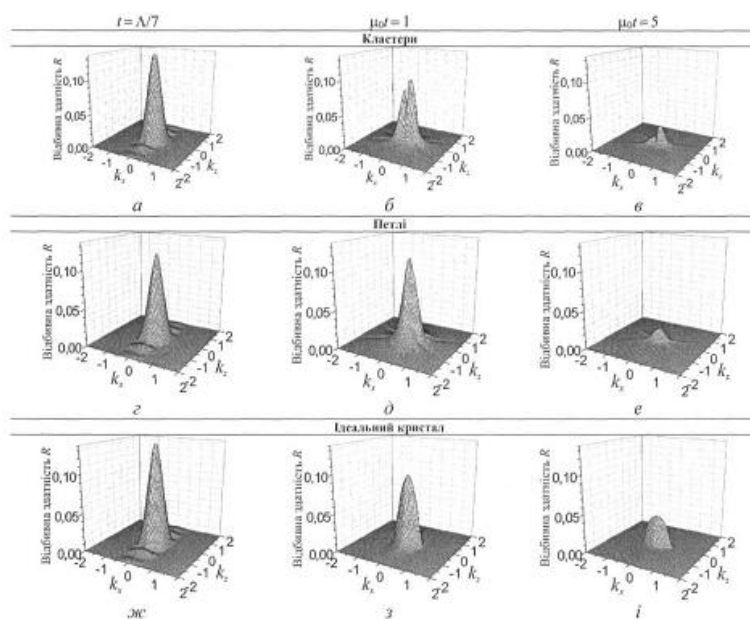
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують джерело квазімонохроматичного випромінювання на базі прецизійного низькоенергетичного прискорювача заряджених частинок, рідкометалевого конвертора та елементів фокусуючої рентгенівської оптики.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують джерело нейтронів.

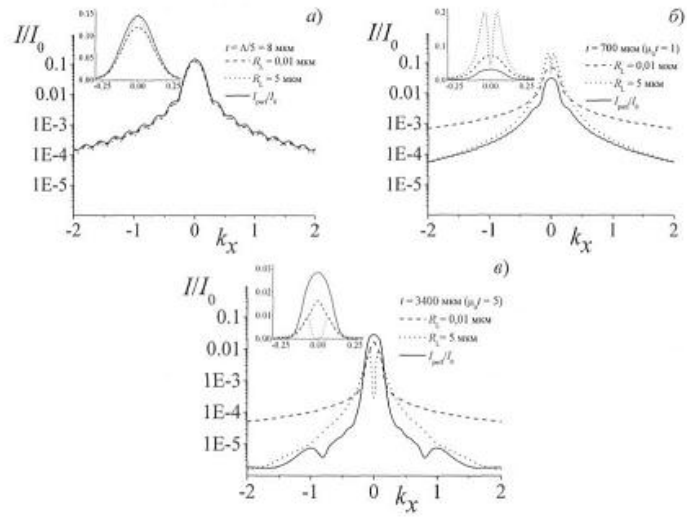
4. Спосіб за пп. 1-3, який **відрізняється** тим, що додатково цілеспрямовано вводять в окремі кристали монохроматора і аналізатора крупні дефекти, макродеформації і/або формують в кристалах кінематично розсіюючі шари з розмірами цих дефектів і товщинами шарів, що перевищують довжину екстинкції.



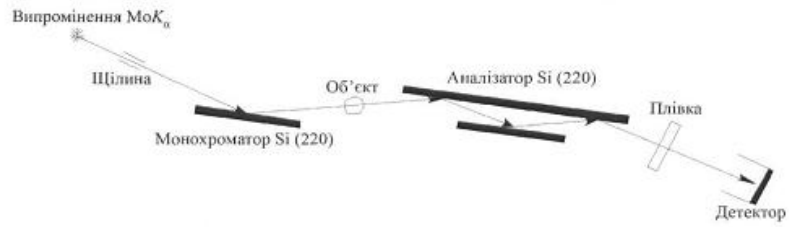
Фіг. 1



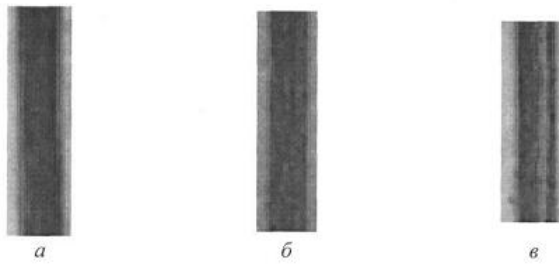
Фіг. 2



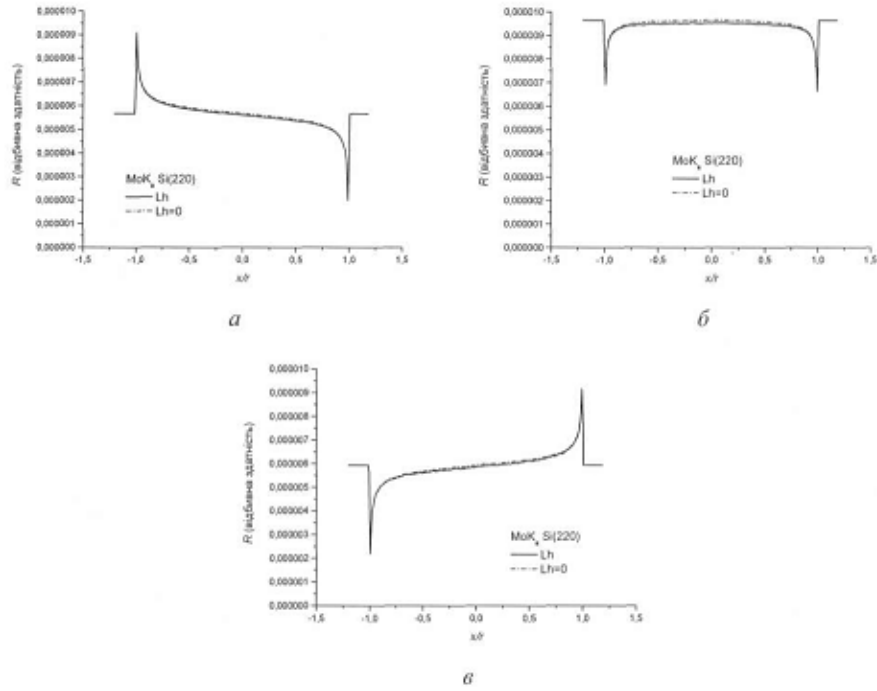
Фіг. 3



Фіг. 4



Фіг. 5



Фіг. 6

Комп'ютерна верстка Л. Бурлак

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601