

МЕТОД ТА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРІЄНТАЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПРОХОДЖЕННЯ ІОНІВ ЧЕРЕЗ ТОНКІ МОНОКРИСТАЛИ

В. І. Сорока, М. В. Арцимович, І. О. Мазний

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Запропоновано новий підхід щодо вирішення завдання вимірювання кутових розподілів сильно диференційованих за інтенсивністю потоків іонів. Завдяки ефекту каналування таке завдання регулярно постає в експериментах з дослідження проходження іонів через тонкі монокристали. Підхід базується на використанні додаткового розсіяння іонів на не монокристалічній мішені, після проходження ними монокристала. Маніпулятор додаткової мішені стикується з основною камерою, обладнаною тривісним гоніометром. Маніпулятор дає можливість переміщувати додаткову мішень в околі прямого пучка в межах $\pm 3^\circ$ в усіх напрямках і дозволяє вимірювати кутові розподіли іонів з точністю ≤ 1 мін. Метод та установку з успіхом апробовано на пучку протонів однокінцевого електростатичного прискорювача ЕГ-5. На даний час вимірювання продовжуються на тандемному прискорювачі ЕПП-10 ІЯД НАН України.

1. Вступ

Рух заряджених частинок у монокристалах, у зв'язку з можливістю каналування й блокування, відрізняється від їх руху в аморфних тілах. Каналування спостерігається завжди, якщо певну кристалографічну вісь або площину кристала орієнтовано в напрямку вузькоколімованого пучка. За цієї умови, завдяки корельованій серії малокутових кулонівських розсінь, траєкторія частинки набуває стабільності. Ефект каналування супроводжується цілим рядом проявів.

Більшість робіт з дослідження ефекту каналування та його використання виконується на товстих мішенях-кристалах. Але деякі з проявів ефекту доступні для спостереження тільки на тонких кристалах. При цьому тонкими слід вважати такі кристали, через які іони заданої енергії проходять не гальмуючись повністю. Проходження іонів через монокристали залежить від багатьох взаємозв'язаних параметрів: товщини кристала, заряду, маси й енергії прискорених іонів, емітанса пучка, орієнтації кристала, критичних кутів каналування, величин деканалування й багаторазового розсіяння, кута нахилу осі пучка відносно вибраного кристалографічного напрямку.

Дослідження процесу проходження має і пізнавальний, і практичний інтерес. У теорії процесу залишаються ще нез'ясовані питання. Вони стосуються, наприклад, енергетичних втрат частинок при каналуванні [1, 2], імовірності захвату частинок з неорієнтованого (random) потоку до каналованого [3], можливості самофокусування пучка частинок у кристалі [4], особливостей планарних осциляцій частинок при площинному каналуванні [5] тощо. З експериментальних даних з проходження іонів можна зробити певні висновки про динаміку цього процесу, зокрема про перерозподіл частинок у каналі. Це має пряме відношення до практичних завдань ядерного мікроаналізу, особливо для визначення положення домішок у ґратці кристала [6]. З експериментальних даних з проходження можна отримати також відомості про вплив режиму каналування на встановлення зарядової рівноваги в пучку іонів. Ці дані важливі для створення перезарядних мішеней, у тому числі й для тандемних прискорювачів. Такі мішені, крім максимальної конверсії заряду іонів, повинні забезпечувати мінімальне кутове розходження пучка [7]. Обґрунтовуючи актуальність проблеми, перелік прикладів можна продовжити.

Проведення експериментів з каналування на проходження обмежують дві обставини. Перша обставина пов'язана з необхідністю мати тонкі та якісні монокристалічні мішені, а друга стосується вибору методу вимірювання кутових розподілів сильно диференційованих

за інтенсивністю потоків частинок. Для вимірювання потоків частинок, що пройшли через тонкі мішені, застосовують фотопластинки й трекові детектори [8, 9] або флуоресцентні екрани [5]. Якщо є можливість досягти дуже малих струмів з прискорювача, підтримуючи при цьому стабільність його роботи, можна скористатися напівпровідниковими або сцинтиляційними детекторами [10 – 13]. З метою дослідження кутових розподілів іонів, що пройшли тонку монокристалічну мішень, нами запропоновано скористатися додатковим розсіянням іонів на тонкій не монокристалічній мішені під одним з передніх кутів з подальшою реєстрацією їх напівпровідниковими детекторами [14]. Метод додаткової мішені взагалі-то відомий у фізиці. У нашому ж випадку він дозволяє, не змінюючи режимів роботи прискорювача й проводки пучка, вимірювати з високою кутовою роздільною здатністю розподіл великих потоків іонів, тим часом як система детектування не зазнає перевантажень і працює в звичайному режимі. Далі опишемо методику в деталях, оскільки в роботі [14] подано тільки схему експерименту. Більше того, з часу перших вимірювань методика вдосконалювалася й зазнала суттєвих змін.

2. Методика досліджень

На рис. 1 показано загальну схему експерименту з дослідження кутових розподілів іонів, які пройшли тонку монокристалічну мішень.

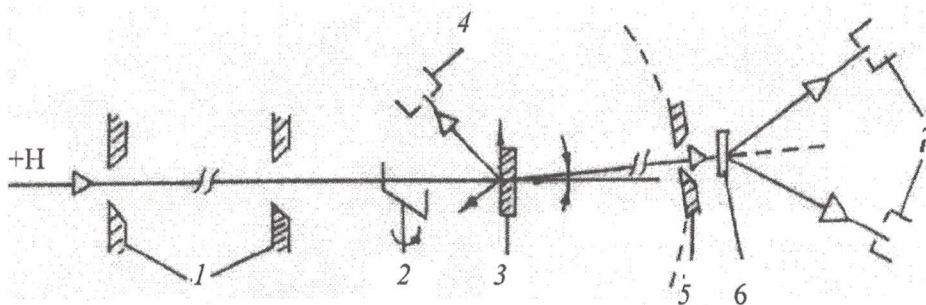


Рис. 1. Схема експерименту: 1 – коліматор пучка частинок з прискорювача; 2 – монітор-переривач; 3 – тривісний гоніометр з досліджуваною мішенню; 4 – детектор зворотного розсіювання; 5 – коліматор додаткової мішені; 6 – додаткова мішень; 7 – детектори.

Беручи до уваги механіку, можна виділити три основні складові частини розробленої методики. Їх призначенням є: формування пучка з необхідними для експериментів по каналуванню параметрами (забезпечується коліматором), орієнтування й переміщення досліджуваної мішені-кристала в просторі (забезпечується маніпулятором-гоніометром основної мішені), дослідження проходження та малокутового розсіювання іонів (забезпечується маніпулятором додаткової мішені). Оскільки особливості конструкції та роботи перших двох частин установки описано раніше [15], обмежимося лише наведенням їх основних функціональних параметрів. Коліматор дає можливість формувати пучки іонів з емітансом на мішені на рівні $\geq 0,3$ мм мрад, при кутовому розходженні ~ 1 мін ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$ рад). Наведені величини параметрів задаються умовами осьового й площинного каналувань іонів низьких і середніх енергій у монокристалах. Ці ж умови визначають і мінімальний крок повороту осей гоніометра та точність відпрацювання кутів. Тривісний гоніометр має такі межі зміни кутів: вісь "Х" (обертання) - $\pm 360^\circ$, вісь "У" (горизонтальна) - $\pm 45^\circ$, вісь "Z" (вертикальна) - $\pm 75^\circ$. Похибка суміщення осей гоніометра на поверхні мішені $\approx 0,1$ мм. З такою ж точністю передбачено сканування пучка по поверхні мішені.

Схему маніпулятора додаткової мішені показано на рис. 2. За допомогою кронштейна 6 він жорстко закріплюється на юстирувальній опорі установки. Спеціально виготовлений довгий сильфонний вузол 5 довжиною 260 мм служить для стикування маніпулятора з вихідним фланцем камери реакцій 1. Механізм 4 забезпечує плавне (вручну) або дискретне

(дистанційно) переміщення камери 2 другої мішені навколо центра першої мішені у взаємно перпендикулярних напрямках в околі прямого пучка в межах $\pm 3^\circ$. За умови дистанційного керування приводними двигунами (на схемі не показано) один крок відповідає переміщенню 0,12 мм. Відстань між досліджуваною мішенню, розміщеною в камері 1, та додатковою мішенню 7, розміщеною в камері 2, становить 700 мм. На такій базі, з діафрагмою 0,2 мм, можна вимірювати кутовий розподіл з точністю біля 1 мін. Детектування розсіяних на мішені 7 частинок здійснюється напівпровідниковими детекторами 3.

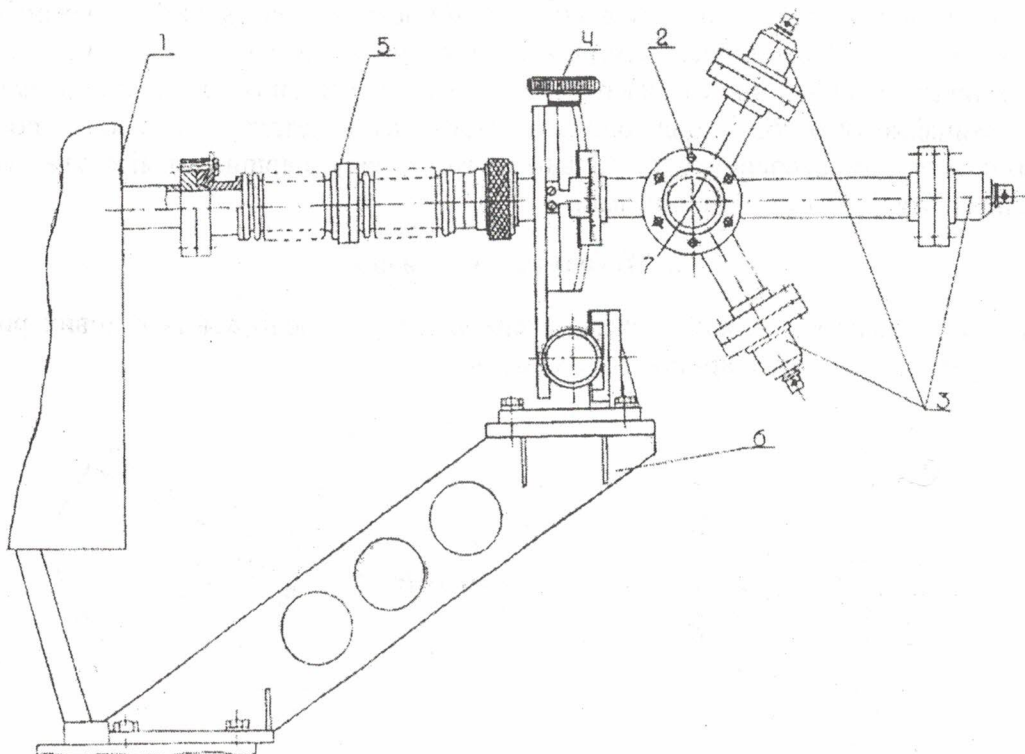


Рис. 2. Маніпулятор додаткової мішені.

Усі попередні юстирувальні операції установки в цілому виконуються з використанням лазерного променя, який дзеркалами спрямовується в коліматор 1 (див. рис.1). Початкове орієнтування монокристалічної мішені, спостерігаючи індуковане пучком іонів відображення структури кристала на флуоресцентному екрані, проводять гоніометром. Екран уводиться під пучок між першою та другою мішенями. Спостереження структури дистанційне, з використанням телеустановки. Для тонкої мішені, на відміну від товстої, така процедура значно спрощує пошук необхідних осей або площин кристала. Для кінцевого орієнтування кристала використовується ефект каналування й вимірюються кутові залежності виходу зворотного розсіяння іонів (детектор 4 на рис. 1).

Останнім часом, у процесі підготовки до експериментів на тандемному прискорювачі, було розроблено й реалізовано автоматизовану вимірювальну систему, яка структурно складається з кількох функціонально пов'язаних частин. До них належать: аналогова частина, яка в свою чергу складається з детекторів, трактів підсилення та трактів формування й аналогової обробки спектрометричних сигналів; цифрова частина на основі модулів КАМАК, що виконують автономну попередню обробку й накопичення інформації в реальному масштабі часу [16]; керуюча ЕОМ система на базі IBM PC, яка забезпечує обмін даних з модулями КАМАК через контролер FK4410; прикладне програмне забезпечення для повної реалізації експериментальної методики та керування проведенням експерименту на всіх його етапах.

Структурну схему програмного забезпечення (ПЗ) показано на рис. 3. ПЗ функціонує під керуванням операційної системи MS DOS, що продиктовано винятковими можливостями цієї системи для організації монопольного використання ресурсів EOM в інтересах обробки процесів, які потребують швидкої реакції на їх запит.

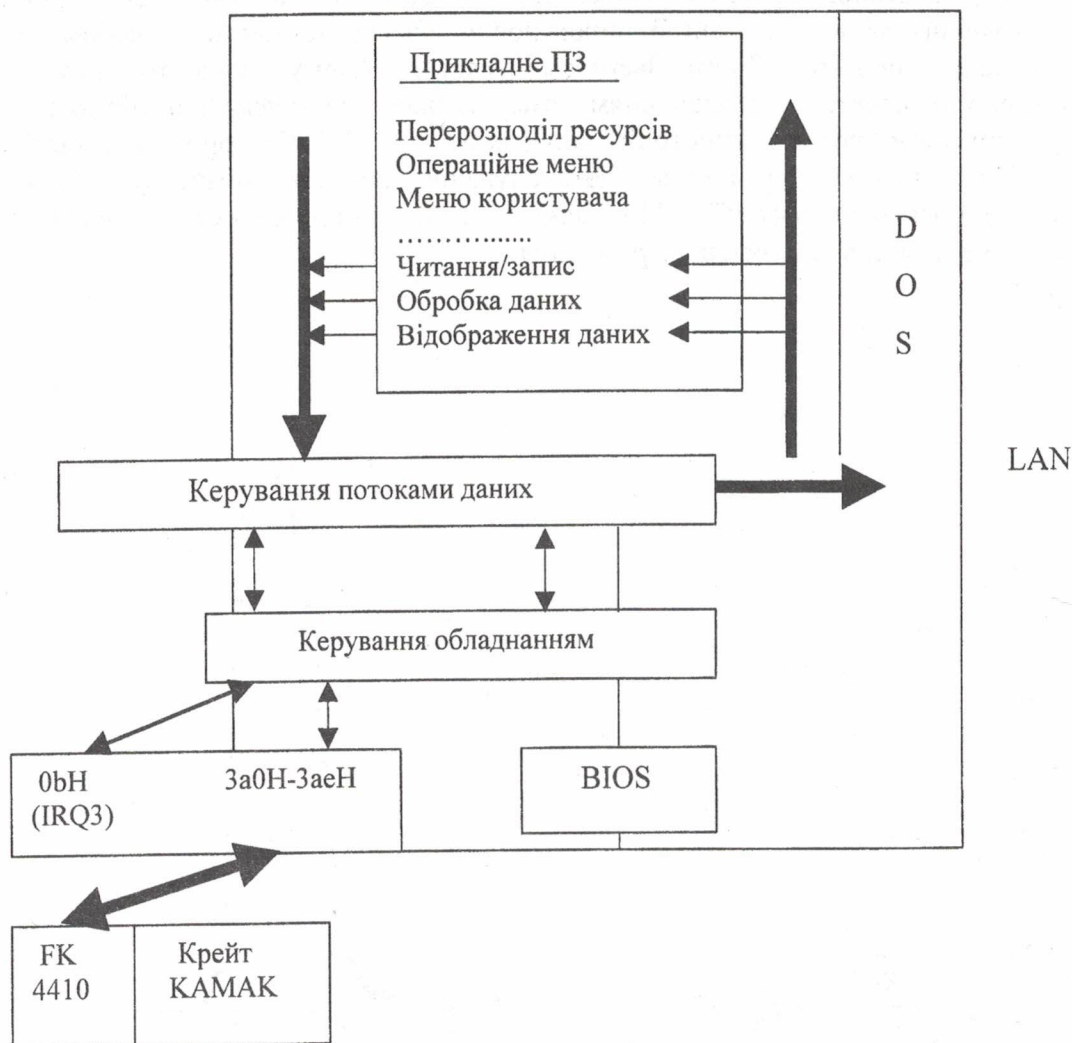


Рис. 3. Структурна схема програмного забезпечення.

ПЗ складається з драйвера обслуговування крейту КАМАК та програми MASTER, що об'єднує ряд підпрограм і процедур: MAIN_MENU – операційне меню для діалогу з оператором по головних функціях; RESOURS – процедура обліку й перерозподілу ресурсів EOM; VISUAL – процедура графічного представлення даних з можливостями обробки спектрів за допомогою маркера; CALC – процедура розрахунку даних методами математичного програмування; READ_WRITE – процедура обслуговування файлової системи обробки даних.

3. Результати випробувань

Методику було апробовано при вимірюванні кутових розподілів протонів, які пройшли тонкі монокристали кремнію [14]. Метою експерименту стало дослідження можливості самофокусування частинок у кристалі [4]. Вимірювання виконано на пучку протонів з енергією 3 МеВ (прискорювач ЕГ-5). Наведені нижче рисунки, що повною мірою ілюструють можливості запропонованого методу й створеної методики, представлено вперше.

На рис. 4 показано спектри зворотного розсіяння протонів, зареєстрованих детектором 4 (див. рис. 1). Спектри одержано для неорієнтованого положення монокристала кремнію та при орієнтаціях $\langle 111 \rangle$, (111) . Моніторування здійснювалося за тією частиною заряду, який переносився пучком із прискорювача й збирався монітором-переривачем 2. Використовуючи спектр для неорієнтованого кристала та формули спектрометрії зворотного розсіяння можна визначити товщину мішені в місці її опромінення. Одержане таким способом значення товщини мішені становить 2,7 мкм. Звертаємо увагу на форму неорієнтованого спектра. Зменшення висоти спектра із зменшенням номера каналу зумовлено наявністю широкого резонансу в пружному розсіянні протонів на ядрах Si^{28} [17, 18]. При орієнтації площинного каналу (111) в напрямку пучка ефект деканалування повністю компенсує вплив цього резонансу, а при осовій орієнтації $\langle 111 \rangle$ - деканалування на шляху, який дорівнює товщині мішені, перевищує вплив резонансного розсіяння.

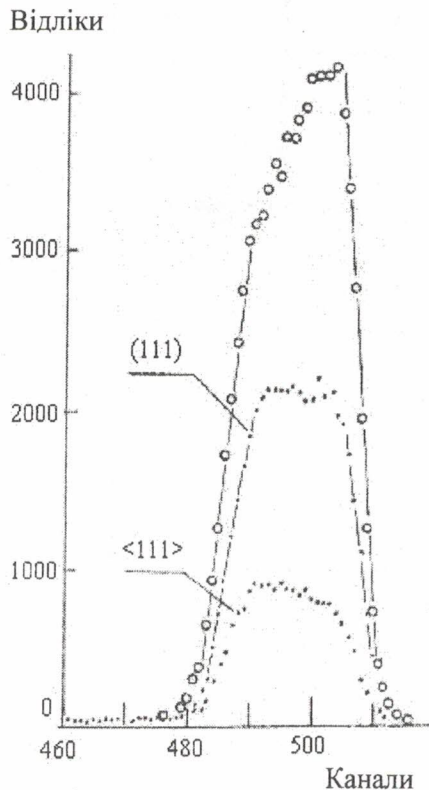


Рис. 4. Спектри зворотного розсіяння протонів на кремнії (2,7 мкм), отримані для неорієнтованого кристала та орієнтацій $\langle 111 \rangle$, (111) . ($E_p = 3,0$ MeV, $\theta_d = 164^\circ$).

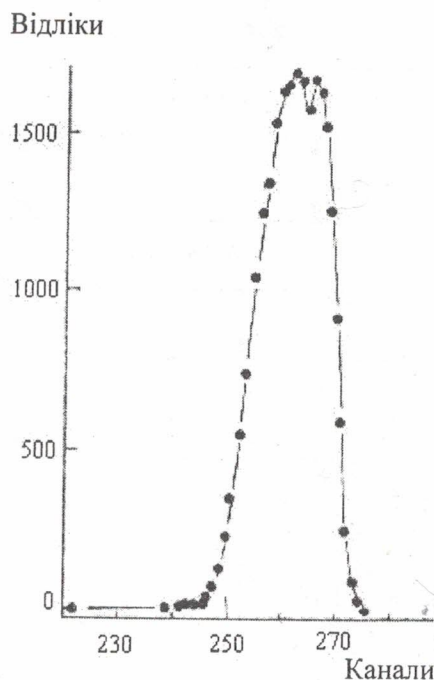


Рис. 5. Спектр протонів, які пройшли монокристал кремнію (2,7 мкм) і розсіялися на нікелі (2,24 мг/см²). ($E_p = 3,0$ MeV, $\theta_d = 60^\circ$).

Приклад спектра протонів, які пройшли першу мішень і потім розсіялися на другій мішені (нікель) під кутом 60° , наведено на рис. 5. Відомо, що енергетичні гальмівні втрати заряджених частинок у монокристалах залежать від їх орієнтації відносно пучка. У зв'язку з цим енергія частинок, які налітають на другу мішень, змінюється при невеликих нахилах першої мішені. Проте впливом цього ефекту можна знехтувати, ураховуючи монотонність зміни перерізу резерфордівського розсіяння й незначні (~ 100 кеВ) втрати протонів на гальмування в обох мішенях. Ніяких змін форми спектра при зміні положення другої мішені відносно першої не спостерігалось.

На рис. 6 показано спектр зворотного розсіяння протонів з енергією 4,5 MeV, одержаний на тандемному прискорювачі ЕПП-10 з використанням оновленої системи отримання й первинного опрацювання даних. За мішень знову служив монокристал кремнію. При отриманні спектра положення кристала відносно пучка було неорієнтованим. Товщина мішені в місці зондування пучком дорівнює ~ 75 мкм. Втрати енергії протонів при

проходженні мішені становлять ~ 1 MeV. Структура спектра відображає резонансний характер взаємодії протонів з ядрами ^{28}Si [17, 18].

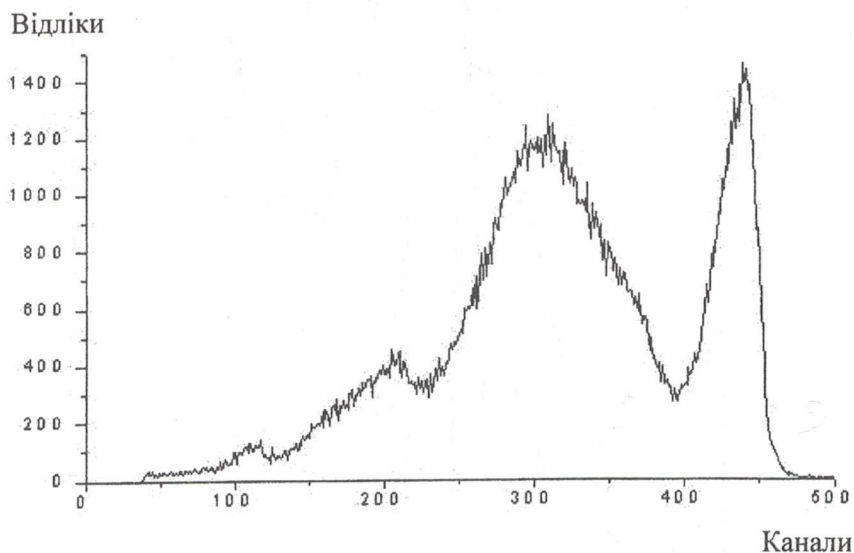


Рис. 6. Спектр зворотного розсіювання протонів на кремнії товщиною ~ 75 мкм ($E_p = 4,5$ MeV, $\theta_d = 165^\circ$).

Результати вимірювань профілів пучка протонів з енергією 3 MeV, які пройшли монокристал кремнію товщиною 2,7 мкм, показано на рис. 7 (спектри реєструвалися детекторами 7, див. рис. 1). По осі абсцис відкладено кут нахилу осі маніпулятора щодо осі прямого пучка з прискорювача. Для заданої геометрії експерименту кут нахилу в 1 мін відповідає відстані $\sim 0,2$ мм. Два профілі отримано при суміщенні напрямків $\langle 111 \rangle$ і (111) з віссю пучка. Інші два профілі відповідають вимірюванням як прямого пучка з прискорювача, так і пучка після проходження протонами кристала, що знаходився в неорієнтованому положенні. Це положення вибиралося таким чином, щоб кут нахилу між віссю пучка й напрямком $\langle 111 \rangle$, перпендикулярним до поверхні кристала, становив 2° . Необхідно було при цьому стежити, щоб не потрапити в якийсь із площинних каналів. Праворуч у верхній частині рис. 7 показано орієнтаційні залежності відносного виходу зворотного розсіювання протонів (χ , відн. од.) для осевого $\langle 111 \rangle$ і площинного (111) каналів (спектри реєструвалися детектором 4, див. рис. 1). По осі абсцис відкладено кут нахилу осі гоніометра Y відносно прямого пучка. Моніторування всюди здійснювалося до однакових відліків монітора-переривача. Величина χ дорівнює відношенню $N_{\text{ор.}}/N_{\text{неор.}}$, де $N_{\text{ор.}}$ — кількість сумарних відліків у виділеній частині спектра для певної орієнтації кристала, а $N_{\text{неор.}}$ — кількість сумарних відліків у тій же частині спектра для неорієнтованого відносно пучка кристала. Відмічаємо, що максимуми проходження протонів для напрямків $\langle 111 \rangle$ і (111) відповідають мінімумам виходів зворотного розсіювання для тих же напрямків. Отже, маємо очевидне підтвердження того, що збільшення проходження при каналуванні пов'язано з подавленням процесів, які потребують близького підходу налітаючих частинок до ядер (резерфордського зворотного розсіювання в даному експерименті). Величина $\chi_{\text{мін.}}$ гранично може дорівнювати відношенню $S_{\text{ат.}}/S_{\text{ком.}}$, де $S_{\text{ат.}}$ — площа, зайнята в елементарній кристалічній комірці атомами (у перерізі до виділеного напрямку з урахуванням теплових коливань атомів), а $S_{\text{ком.}}$ — загальна площа перерізу комірки в тому ж напрямку. Експериментальне значення $\chi_{\text{мін.}}$ (це видно на рисунку) дорівнює $\sim 0,02$. Таку ж приблизно величину дає розрахунок для граничного значення. Величина $\chi_{\text{мін.}}$ несе інформацію й про досконалість вирощеного кристала, і про чистоту експерименту в цілому. Мішенню в експерименті були монокристали кремнію, вирощені методом зонної плавки.

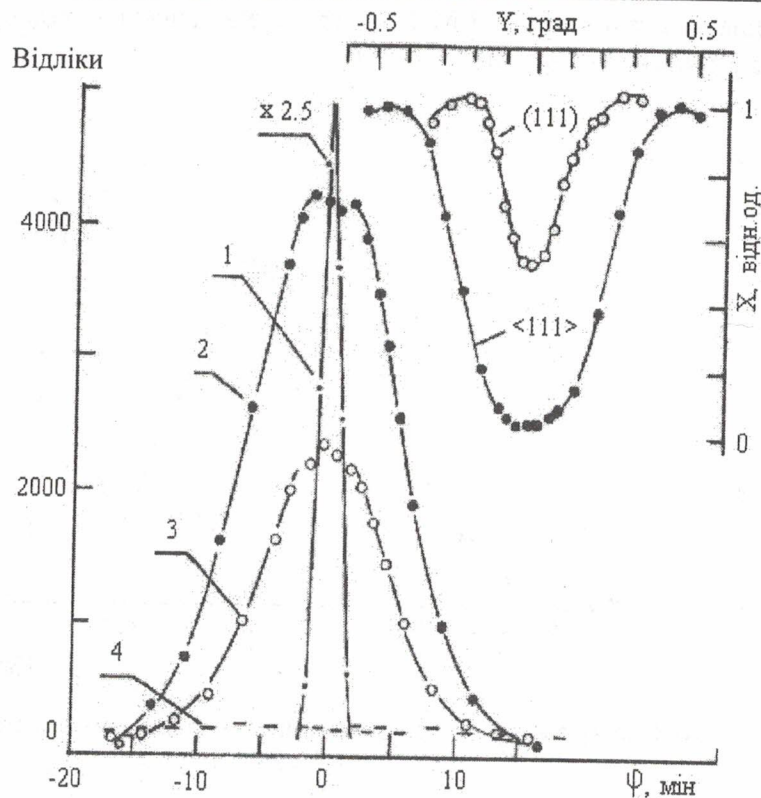


Рис. 7. Профілі пучка протонів з енергією 3,0 МеВ: 1 – прямого з прискорювача; 2, 3 – після проходження монокристала кремнію товщиною 2,7 мкм при орієнтаціях $\langle 111 \rangle$ та (111) відповідно; 4 – після проходження того ж монокристала, нахилоного на кут 2° . На вставці – орієнтаційні залежності виходу зворотного розсіювання.

4. Висновки

У результаті проведених досліджень проілюстровано придатність та можливості запропонованого методу й створеної методики для вимірювання кутових розподілів великих потоків іонів, інтенсивності яких, до того ж, можуть змінюватися на декілька порядків у тому самому експерименті. Такі умови є характерними при дослідженні орієнтаційних залежностей проходження іонів через тонкі монокристали.

Отримане в ході випробувань значення $\chi_{\min}$ на рівні 0,02 для осевого $\langle 111 \rangle$ каналу монокристала кремнію свідчить про досконалість усього вимірювального комплексу. За розрахунками приблизно така ж величина одержується для ідеального кристала кремнію.

На описаній методиці, з використанням пучка іонів тандемного прискорювача ІЯД НАН України, планується проведення різнопланових експериментів. Подальше доопрацювання методики буде спрямовано на досягнення вищого рівня автоматизації експерименту та програмного забезпечення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhao Z.Y., Arrale A.M., Li S.L. Experimental evidence for a discrete transition to channeling for 1.0-MeV protons in Si $\langle 100 \rangle$ // Phys. Rev. A. - 1998. - Vol. 57. - P. 2742.
2. Балашов В.В., Балашова Л.Л., Бодренко И.В. Кинетика торможения быстрых протонов при прохождении через ориентированную кристаллическую мишень // Ядерная физика. - 2002. - Т. 65, № 3. - С. 435 - 439.
3. Karamian S.A., Assmann W., Ertl K. et al. Capture from random flux to channeling for protons transmitted through a Si foil // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. - 2000. - Vol. B164, 165. - P. 61 - 67.
4. Кумахов М.А. О возможности самофокусировки пучка частиц в кристалле // Письма в ЖТФ. - 1988. - Т. 14, вып. 13. - С. 250 - 252.

5. Breese M.B.N., King P.J.S., Grime G.W. et al. Observation of planar oscillation of MeV protons in silicon using ion channeling patterns // Phys. Rev. B. - 1996. - Vol. 53, No 13. - P. 8267 - 8276.
6. Chu W.K., Mayer J.W., Nicolet M.A. Backscattering spectrometry. - New. York: Acad. Press, 1978. - 384 p.
7. Ведьманов Г.Д., Лазарев Ю.Г., Николайчук Л.И. и др. Угловые распределения протонов с энергией 10 MeV при некоторых режимах каналирования в тонких монокристаллах кремния // Изв. АН СССР. Сер. физ. - 1995. - Т. 59, № 10. - С. 141 - 146.
8. Gemmel D.S. Channeling and related effects in the motion of charged particles through crystals // Rev. Mod. Phys. - 1974. - Vol. 46. - P. 129 - 227.
9. Luttner V., Sizmann R., Fujimoto F. Diffraction effect of MeV α -particles passing through a thin silicon crystal // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. - 1988. - Vol. B33. - P. 73 - 76.
10. Ведьманов Г.Д., Козлов В.П., Кудрявцев В.Н. и др. Измерение угловых распределений ионов с энергией в несколько MeV // ПТЭ. - 1989. - Т. 2. - С. 47 - 50.
11. Parma E.J., Hart R.R., Bartelt J.L. Channeling transmission of protons through thin silicon membranes // J. Vac. Sci. Technol. - 1987. - Vol. B5(1). - P. 228 - 231.
12. Ермак В.П., Касьян С.В., Кохнюк К.С. и др. Квазипреломление электронного пучка монокристаллом кремния // Вопр. атом. науки и техники. Сер. ЯФИ. - 1990. - Т. 3(11). - С. 18 - 21.
13. King P.J.C., Breese M.B.H., Smulders P.J.M. et al. Observation of a Blocking to Channeling Transition for MeV Protons at Stacking Faults in Silicon // Phys. Rev. Lett. - 1995. - Vol. 74(3). - P. 411 - 414.
14. Сорока В.И., Арцимович М.В., Могильник И.Ф. Угловые распределения протонов, прошедших тонкие монокристаллы кремния // Письма в ЖТФ. - 1991. - Т. 17(6). - С. 53 - 56.
15. Artsimovich M.V., Mogilnik I.F., Soroka V.I. The measuring and calculating complex "Kanion" for researches in the field of the applied nuclear physics. - Kyiv, 1997. - 18 p. - (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-97-8).
16. Березин Ф.Н., Кисурин В.А., Офенгенден Р.Г. Система автоматизации экспериментальных исследований физических процессов в ядрах. - Киев, 1993. - 16 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-93-16).
17. Belote T.A., Kashy E., Risser J.R. Excited states in ^{29}P from the scattering of protons by ^{28}Si // Phys. Rev. - 1961. - Vol. 122. - P. 920 - 928.
18. Soroka V.I. Selected data on the low-energy ions elastic scattering for the use in nuclear microanalysis. - Kyiv, 1994. - 48 p. - (Prepr. / National Academy of Sciences of Ukraine. Institute for Nuclear Research; KINR-94-2).

МЕТОД И УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРИЕНТАЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРОХОЖДЕНИЯ ИОНОВ ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ МОНОКРИСТАЛЛЫ

В. И. Сорока, М. В. Арцимович, И. А. Мазный

Предложен новый подход для решения задания измерения угловых распределений сильно дифференцированных по интенсивности потоков ионов. Благодаря эффекту каналирования это задание регулярно возникает в экспериментах по исследованию прохождения ионов через тонкие монокристаллы. Подход основан на использовании дополнительного рассеяния ионов на не монокристаллической мишени, после прохождения ними монокристалла. Манипулятор дополнительной мишени стыкуется с основной камерой, оборудованной трехосным гониометром. Манипулятор позволяет перемещать дополнительную мишень в окрестности прямого пучка в пределах $\pm 3^\circ$ во всех направлениях и позволяет измерять угловые распределения ионов с точностью ≤ 1 мин. Метод и установка успешно испытаны при измерениях на пучке протонов одноконцевого электростатического ускорителя ЭГ-5. В настоящее время измерения продолжаются на тандемном ускорителе ЭГП-10 ИЯИ НАН Украины.

THE METHOD AND EQUIPMENT FOR THE INVESTIGATION OF IONS ORIENTING TRANSMISSION THROUGH THIN SINGLE CRYSTALS

V. I. Soroka, M. V. Artsimovich, I. O. Mazny

A new approach is proposed to solve the task of angular distribution measurement of intensity strongly differentiated ions fluxes. Channeling effect makes this problem a regular feature of experimental study of ions orientating transmission through thin single crystals. The approach is based on the use of ions

additional scattering by an amorphous (polycrystalline) target after passing through single crystal. The additional target manipulator is joined with the principal target chamber equipment with three-axis goniometer. The manipulator allows to move an additional target in the vicinity of the accelerator beam within the limits of $\pm 3^\circ$ in all directions and allows to measure the angular distribution of scattered ions with the accuracy of 1 min. The method and equipment were tested at the single ended electrostatic accelerator (EG-5) using a proton beam. At present the measurements have been resumed at the tandem accelerator (EG-10) of the Institute for Nuclear Research of the Academy of Sciences of Ukraine.

Надійшла до редакції 22.10.02,
після доопрацювання – 26.12.02.