

## ВІДЗИВ

офіційного опонента д.ф.-м.н., проф. Зауличного Я.В. на  
дисертаційну роботу

Аль-Омарі Мохаммада Абдулла Мохаммада

**«Особливості параметричного рентгенівського випромінення та  
іонізації атомів при розповсюдженні високоенергетичних  
електронів у кристалах»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-  
математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Визначення закономірностей та фізичних механізмів взаємодії високоенергетичних електронів із кристалами, яка супроводжується генерацією та дифракцією параметричного рентгенівського випромінення, а також іонізацією глибоких електронних оболонок атомів на сьогодні залишається однією з фундаментальних проблем у фізиці твердого тіла, що потребує комплексного вирішення як з залученням сучасних експериментальних методик, так і теоретичних підходів, які б враховували суттєво багаточастинковий характер вказаних процесів. З іншого боку, дослідження властивостей параметричного рентгенівського випромінення сприяють розробці новітніх методів діагностики кристалічної та електронної структури твердих тіл, які б розширювали і доповнювали можливості рентгеноструктурного аналізу та рентгенівської емісійної спектроскопії. З'ясування фізичних закономірностей процесів іонізації атомів при розповсюдженні високоенергетичних електронів у кристалах також є необхідним для розробки сучасних та удосконалення існуючих методів визначення радіаційної стійкості твердих тіл при електронному опроміненні. Тому тема дисертаційної роботи Аль-Омарі МА.М, яка присвячена дослідженню особливостей параметричного рентгенівського випромінення та процесів кратної іонізації електронних оболонок атомів при розповсюдженні



як релятивістських (7 MeV), так і нерелятивістських (5 – 100 keV) високоенергетичних електронів у кристалах, є, безумовно, **актуальною**.

Дослідження, представлені у дисертаційній роботі Аль-Омарі МА.М, виконувалися у рамках тематики науково-дослідної лабораторії «Фізичне матеріалознавство твердого тіла» кафедри загальної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Ряд досліджень було виконано з використанням лабораторного комплексу "Рентген 1", створеного на базі синхротрону "Пахра" у лабораторії прискорювальних пристроїв Відділу фізики високих енергій Фізичного інституту ім. П.Н. Лебедева Російської Академії Наук.

Дисертаційна робота Аль-Омарі МА.М складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 142 сторінки, 43 рисунки, 6 таблиць і список літератури із 166 найменувань.

У **першому розділі** виконано аналіз наявних літературних даних щодо експериментальних характеристик параметричного рентгенівського випромінення у моно- та полікристалах при розповсюдженні релятивістських електронів, розглянуто існуючі теоретичні моделі генерації та дифракції таких рентгенівських променів. Викладено результати експериментальних досліджень та теоретичного опису процесів кратної  $1s^{-1}2p^{-n}$  ( $n = 1 - 3$ ) іонізації атомів  $3p$  та  $3d$  елементів. Необхідно відзначити залучення до розгляду значної кількості літературних джерел, що дозволило автору кваліфіковано обґрунтувати та сформулювати задачі власного дослідження.

У **другому розділі** дисертації надається опис основних експериментальних методів дослідження спектрально-кутового розподілу параметричного рентгенівського випромінення та рентгенівських емісійних спектрів кратноїіонізованих атомів. Зокрема, детально проаналізовані



характеристики і параметри лабораторного комплексу «Рентген 1» для дослідження властивостей параметричного рентгенівського випромінення за умов зворотної реєстрації, представлено методики отримання та обробки рентгенівських емісійних  $K\alpha L^1$ ,  $K\alpha L^2$ ,  $K\alpha L^3$  спектрів  $3p$  та  $3d$  елементів. Приділено достатньо уваги аналізу джерел можливих експериментальних похибок.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячено викладенню результатів дослідження спектрально-кутових характеристик параметричного рентгенівського випромінення при розповсюдженні високоенергетичних релятивістських електронів у кристалах. Зокрема, теоретично визначено характеристики конусу параметричного рентгенівського випромінення при ковзаючому русі електронного пучка у тонких (десятки – сотні нанометрів) кристалах. Вперше отримано спектри параметричного рентгенівського випромінення у монокристалічному кремнії та високоорієнтованому піролітичному графіті (ВОПГ) при зворотній реєстрації, експериментально досліджено форму та кутові параметри конусу параметричного рентгенівського випромінення у таких кристалах. Вперше виконано експериментальне дослідження параметрів (інтенсивність, ширина на половині висоти) максимумів параметричного рентгенівського випромінення у порошкових зразках алмазу залежно від розмірів зерен. Виявлено вплив структурної досконалості кристалів Si та ВОПГ на характеристики конусу параметричного рентгенівського випромінення, а також залежність інтенсивності максимумів від розмірів блоків когерентного розсіювання у порошках алмазу.

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження рентгенівських емісійних  $K\alpha L^1$  спектрів у металах Ti, V, Cr та їх оксидах при збудженні електронами з енергією 25 кеВ, а також  $K\alpha_{1,2}$ ,  $K\alpha L^1$ ,  $K\alpha L^2$ ,  $K\alpha L^3$  спектрів Al при бомбардуванні електронами з енергіями 4,5 – 100 кеВ. Експериментально



визначено відносні інтенсивності  $I(^3P)/I(^1P)$  груп ліній, які відповідають радіаційним переходам при розпаді станів  $^1P$  та  $^3P$  термів конфігурації  $1s^{-1}2p^{-1}$  вказаних  $3d$  елементів. Виявлено зменшення відносної інтенсивності  $I(^3P)/I(^1P)$  для Ti, V, Cr при зростанні ступеню локалізації заряду валентних електронів при переході від металів до оксидів. Запропоновано модель такого ефекту на основі врахування міжканальної взаємодії континуумів  $1s^{-1}2p^{-1}(^1P)\epsilon p$  та  $1s^{-1}2p^{-1}(^3P)\epsilon p$ , які утворюються при двократній іонізації атому та наявності повільного електрона, що взаємодіє з таким двократно іонізованим атомом у стані  $^1P$  або  $^3P$  терму. Експериментально досліджено структуру та відносні інтенсивності ліній  $K\alpha L^1$ ,  $K\alpha L^2$  та  $K\alpha L^3$  спектрів Al при різних енергіях бомбардуєчи електронів, за якими визначалися відносні імовірності утворення однієї, двох та трьох додаткових  $2p^{-1}$  вакансій при утворенні первинної  $2s^{-1}$  вакансії в акті іонізації атома високоенергетичним електроном. Встановлено вплив екранування вільними електронами на взаємодію континуумів  $1s^{-1}2p^{-2}(^MX_J)2\epsilon p$  при  $1s^{-1}2p^{-2}$  іонізації та  $1s^{-1}2p^{-3}(^MX_J)3\epsilon p$  при  $1s^{-1}2p^{-3}$  іонізації Al.

Важливо, що отримані у дисертаційній роботі Аль-Омарі МА.М експериментальні результати можна вважати **достовірними**, а зроблені на їх підставі висновки **обґрунтованими**. Автор достатньо уваги приділив викладенню методики збудження, реєстрації та обробки отриманих рентгенівських спектрів (як параметричного рентгенівського випромінення, так і рентгенівської емісії), зокрема, аналізу джерел можливих спотворень інтенсивності та форми спектральних ліній, мінімізації випадкових похибок, контролю за відтворюваністю результатів. Розглянуто особливості методів підвищення інтенсивності максимумів ПРВ та зниження загального радіаційного фону у каналі реєстрації комплексу «Рентген 1». Виконано критичне порівняння власних спектроскопічних даних із відомими у



літературі результатами інших авторів. Це дозволило уникнути внутрішніх протиріч в основних твердженнях та досягти узгодженості результатів окремих розділів дисертаційної роботи.

У результаті виконання дисертаційної роботи автором було отримано ряд **нових наукових результатів**, найбільш вагомими з яких можна вважати такі:

- теоретично показано, що при розповсюдженні релятивістських електронів у тонких (десятки - сотні нанометрів) кристалах в області малих кутів ковзання має спостерігатися звуження кутового розтвору конусу параметричного рентгенівського випромінення та зростання його кутової густини;

- встановлено, що при розповсюдженні релятивістських електронів (7 меВ) у порошкових зразках алмазу з розмірами зерен  $d = (0,3 - 42)$  мкм відношення інтенсивностей максимумів ПРВ (111) та (220) зменшується при зростанні діаметру зерен алмазу. Залежність визначається ефектом первинної екстинції при дифракції параметричного рентгенівського випромінення у блоках когерентного розсіювання кінцевих розмірів і може бути використана для розробки нового методу визначення розмірів кристалітів;

- доведено залежність кутового розтвору конусу параметричного рентгенівського випромінення у кристалах залежно від їх структурної досконалості, що зумовлено ефектами динамічної дифракції, які проявляються при зростанні структурної досконалості кристалів при переході від високоорієнтованого піролітичного графіту до монокристалічного кремнію;

- виявлено зменшення відносної інтенсивності  $I(^3P)/I(^1P)$  у 1,6 - 1,9 рази при переході від металів Ti, V та Cr до відповідних оксидів за умови збудження  $K\alpha L^1$  спектрів Ti, V та Cr високоенергетичними електронами (25 кеВ). Запропоновано модель ефекту, що враховує міжканальну взаємодію



континуумів  $1s^{-1}2p^{-1}(^1P)\epsilon p$  та  $1s^{-1}2p^{-1}(^3P)\epsilon p$ , величина якої визначається ефективним радіусом взаємодії ежектованого  $2p$  електрона з двократно  $1s^{-1}2p^{-1}$  іонізованим атомом.

**Практичне значення** отриманих результатів визначається можливостями створення нового методу визначення розмірів мікро- та наночастинок, який базується на виявленій у дисертаційній роботі чутливості відношення інтенсивностей ліній параметричного рентгенівського випромінювання до розмірів блоків когерентного розсіювання. Встановлена залежність відносної інтенсивності сателітних  $K\alpha L^I$  ліній від ступеню локалізації заряду валентних електронів дозволяє виконувати оцінку ефективного заряду атомів у хімічних сполуках, що доповнює існуючі експериментальні та теоретичні методи визначення такого параметру. Отримані результати розширюють існуючі уявлення про вплив розмірів та структурної досконалості кристалів на характеристики параметричного рентгенівського випромінювання, а також динамічного екранування міжканальної взаємодії електронних конфігурацій атому вільними електронами. Результати дисертаційної роботи Аль-Омарі МА.М можуть бути використані у науково-дослідницькій роботі інститутів Академії Наук України (Інститут металофізики, Інститут фізики напівпровідників), а також при викладанні спеціальних курсів з рентгенівської та електронної спектроскопії, структурного аналізу.

Однак, по дисертаційній роботі Аль-Омарі МА.М необхідно висловити ряд зауважень:

1. У роботі експериментально досліджувалися процеси дво-, три-, та чотирикратної іонізації атомів деяких  $3p$  та  $3d$  елементів електронним ударом, зокрема, визначалися відносні імовірності таких процесів та їх механізми. Однак, варто було б у першу чергу розглянути процеси прямої однократної іонізації, наприклад, К-оболонки та порівняти їх



експериментальні характеристики, зокрема, перерізи іонізації, з існуючими теоретичними моделями.

2. Висновок про залежність відношень інтенсивностей максимумів параметричного рентгенівського випромінення від розмірів блоків когерентного розсіювання зроблено тільки для відношення інтенсивностей максимумів (111) та (220) порошкових зразків алмазу. Очевидно, для визначення кількісних характеристик таких залежностей слід було б розширити коло використаних кристалів та дослідити відносні інтенсивності інших максимумів параметричного рентгенівського випромінення.
3. При розгляді залежності кутового розвору конусу параметричного рентгенівського випромінення від структурної досконалості кристалів у роботі не наведено кількісних характеристик структурної досконалості використаних зразків монокристалічного кремнію та високоорієнтованого піролітичного графіту.
4. Висновок про звуження конусу параметричного рентгенівського випромінення при зростанні структурної досконалості кристалів за рахунок ефектів динамічної дифракції варто було б підкріпити кількісними розрахунками, принаймні, оціночного характеру.

Однак, вказані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки розглянутої дисертаційної роботи і не ставлять під сумнів справедливості її основних результатів та висновків. За результатами проведених досліджень автором опубліковано 11 наукових праць, з них 5 – статі у фахових наукових журналах, 6 – тези доповідей у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Представлені друковані праці та автореферат дисертації повністю відображають зміст та основні висновки дисертаційної роботи. Робота написана чітко та зрозуміло, матеріал викладено логічно та послідовно.



У цілому оцінюючи дисертаційну роботу Аль-Омарі Мохаммада Абдулла Мохаммада «Особливості параметричного рентгенівського випромінення та іонізації атомів при розповсюдженні високоенергетичних електронів у кристалах», необхідно відзначити, що у ній представлено розв'язок актуальної задачі фізики твердого тіла – визначено характеристики та фізичні механізми процесів генерації та дифракції параметричного рентгенівського випромінення, а також кратної іонізації атомів при розповсюдженні високоенергетичних електронів у кристалах. Вважаю, що вказана дисертаційна робота відповідає пунктам 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», а Аль-Омарі Мохаммад Абдулла Мохаммад заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Завідувач кафедри металознавства  
та термічної обробки Національного  
технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського",  
д.ф.-м.н., професор

Я.В. Зауличний

Підпис д.ф.-м.н., професора Зауличного Я.В. засвідчую:  
Учений секретар Національного  
технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського"



А.А. Мельниченко