

РОЗСІЮВАННЯ ПОВІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОНІВ ПОВЕРХНЯМИ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО ТАНТАЛУ ТА МОЛІБДЕНУ

О.Б. Шпеник, Т.Ю. Попик, Р.О. Ортіков

Інститут електронної фізики НАН України,
вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017
e-mail:an@zvl.uzhgorod.ua

Представлено вдосконалену конструкцію гіпоциклоїдального електронного спектрометра та нові можливості методики дослідження процесів зворотного розсіювання повільних (0-10 eV) електронів поверхнями полікристалічних металів Мо і Та. Проаналізовано одержані енергетичні залежності інтенсивності пружного відбивання на 180° , коефіцієнта повного відбивання та порогові спектри при зворотному розсіюванні електронів низьких енергій.

У порогових спектрах досліджуваних зразків виявлено тонку структуру, обумовлену утворенням резонансного стану $^2\pi_g$ молекули N_2 .

Ключові слова: адсорбція, поверхня, повільні електрони, резонанс, розсіювання, електронна спектроскопія., електронний спектрометр.

Вступ

Фізика поверхневих явищ у конденсованих системах – напрямок у фізиці твердого тіла, прогрес якого обумовлений вимогами розвитку сучасної мікро- та наноелектроніки. Знання специфіки електронних явищ на поверхні і у приповерхневій області необхідне широкому колу спеціалістів – фізиків, хіміків, технологів, інженерів, що конструюють електронні прилади [1].

Досягнення фізики і хімії поверхні тісно пов'язані з розвитком і розробкою нових методів досліджень. На сьогоднішній день для вивчення поверхневих фаз застосовується весь потужний арсенал сучасної фізики: оптична, електронна і радіоспектроскопія, вимірювання діелектричних втрат, дифракційних спектрів електронів і атомів, електронна тунельна мікроскопія, лазерна діагностика та інші. Для зондування поверхні використовують пучки фотонів, електронів, атомів, молекул і іонів. Це дозволяє одержати інформацію про такі важливі характеристики поверхні як її кристалічна структура, елементний склад, хімічні зв'язки, поверхневі коливання тощо для атомарно-чистих та вкритих

різними адсорбатами поверхонь [1, 2].

Електронна енергетична структура поверхні, яка обумовлює її фізичні і хімічні властивості, досліджується переважно методами електронної спектроскопії: ультрафіолетової (УФЕС) та рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФЕС), спектроскопії характеристичних втрат, спектроскопії повного струму відбитих електронів, дифракції низькоенергетичних електронів. Широке використання електронів обумовлене цілим рядом причин [3]:

- електрони легко фокусуються у тонкі пучки і їх енергію можна змінювати в широкому інтервалі відповідним прискорюючим потенціалом;
- електрони порівняно легко піддаються реєстрації і кількісним вимірюванням;
- використовуючи електронні лінзи і системи відхилення можна отримувати кутовий і енергетичний розподіл електронів;
- додатковою перевагою електронів порівняно з атомами, молекулами й іонами є та обставина, що електрони після їх використання для аналізу поверхні не осідають у вакуумній системі.

Пошук оптимальних режимів отри-

мання і аналізу електронних пучків різних енергій, зважаючи на широкі перспективи їх практичного застосування для вивчення поверхні, продовжується і в наш час.

Одним з методів електронної спектроскопії поверхні є розроблений в Інституті електронної фізики НАН України метод зворотного розсіювання електронів низьких енергій. Він дозволяє визначати коефіцієнти відбивання повільних електронів різномодифікованими поверхнями, вивчати деталі густини розподілу заповнених і пустих об'ємних і поверхневих електронних станів для широкого кола конденсованих систем та досліджувати процеси адсорбції [4-7].

Метою даної роботи було вдосконалення методу зворотного розсіювання повільних електронів, розширення його функціональних можливостей та дослідження процесів взаємодії повільних електронів з поверхнями полікристалів Та і Мо.

Експериментальна установка та методика досліджень

Вивчення процесів взаємодії повільних електронів з поверхнями полікристалічних зразків Та і Мо проведено на установці "Кристал", яка схематично зображена на рис. 1 та детально описана в [5, 8].

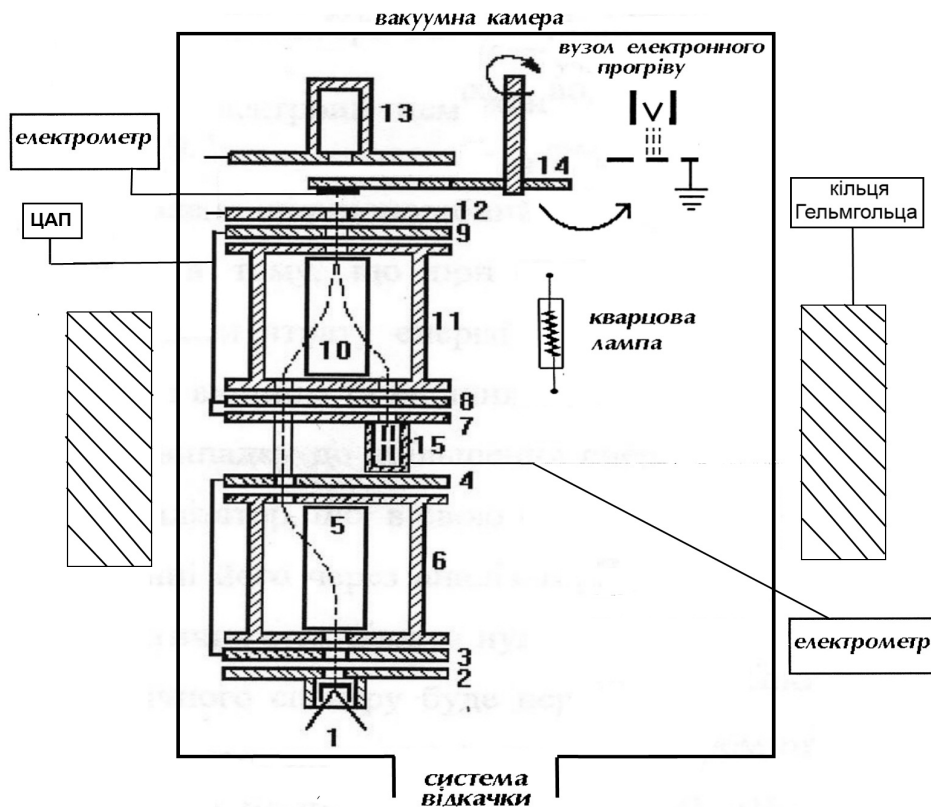


Рис. 1 Схематичне зображення експериментальної установки для дослідження зворотного розсіювання повільних електронів поверхнею твердих тіл з гіпоциклоїдальним електронним спектрометром зворотного розсіювання.

1 – оксидний катод непрямого розжарення; 2 – витягаючий електрод; 3, 4 – вхідний і вихідний електроди монохроматора; 5, 6 – внутрішній і зовнішній електроди циліндричного конденсатора монохроматора; 7, 8, 9 – вхідні і вихідні електроди аналізатора; 10, 11 – внутрішній і зовнішній електроди циліндричного конденсатора аналізатора; 12 – прискорюючий електрод спектрометра; 14 – зразок; 15 – колектор зворотно розсіяних електронів; 13 – колектор первинного електронного пучка, ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

Основною частиною установки є високовакуумна камера, виготовлена з

немагнітної нержавіючої сталі. У цій камері вмонтовані гіпоциклоїдальний

електронний спектрометр (ГЕС), спеціальний гоніометричний пристрій з досліджуваними зразками, кварцова лампа для прогріву об'єму камери та вузол електронного прогріву зразків. Установка оснащена сучасними системами реєстрації первинних та розсіяних електронів.

Зовні камери розташовані кільця Гельмгольца, які всередині камери створюють однорідне магнітне поле, необхідне для роботи спектрометра. Діаметр кілець – 230 мм, напруженість створюваного ними магнітного поля - $\sim 6-8 \times 10^{-3}$ А/м. Неоднорідність магнітного поля в центрі кілець в об'ємі діаметром 60 мм і висотою 150 мм не перевищує 1%.

Відкачка камери здійснюється двома магніторозрядними насосами НОРД-100, а попередній вакуум створюється цеолітовими насосами ЦВА-1-2. Безмасляна відкачка забезпечує відсутність органічних забруднень у вакуумній камері та чистоту робочих поверхонь спектрометра та досліджуваних зразків. Робочий вакуум у камері в процесі досліджень складає $\sim 3-5 \times 10^{-7}$ Па.

Збір та кінцева обробка результатів вимірювань проводиться на комп'ютері за допомогою спеціальних програм.

Основним вузлом установки є гіпоциклоїдальний електронний спектрометр. Він дозволяє формувати і аналізувати електронний пучок у діапазоні енергій 0-10 еВ з повною шириною на напіввисоті максимуму (FWHM) $\sim 20-50$ меВ. Конструкцію і принцип роботи спектрометра детально описано в роботі [8]. Він складається з двох послідовно розташованих електронних енергоаналізаторів, перший з яких є монохроматором електронів, а другий використовується для аналізу пружно і непружно розсіяних електронів.

Деталі спектрометра виготовлено з особливо чистого молібдену і дзеркально відполіровано. Всі електроди перед збиранням ретельно промиваються, протравлюються у спеціальному розчині і очищуються ультразвуком. У зібраному вигляді спектрометр прогривається у вакуумній камері при тиску залишкових газів $P \sim 10^{-6}-10^{-7}$ Па і температурі 500-600К

протягом 20-30 годин перед початком вимірювань і 3-4 перед кожним експериментом.

Схематичний розріз спектрометра представлено на рис. 1. Електроди 2-4, 7-9, 12 – диски, діаметром 24 мм і товщиною 1 мм, а електроди 5, 6 і 10, 11 – коаксіальні циліндри, довжиною 20 мм. Зовнішній діаметр внутрішніх циліндрів 5 і 10 – 4,5 мм, а внутрішній діаметр зовнішніх циліндрів 6 і 11 – 7,5 мм. Для транспортування електронів з монохроматора в аналізатор служить трубка довжиною 5 мм з внутрішнім діаметром 1,2 мм. Плоскі електроди та диски, що утримують зовнішні циліндри, заізолювано керамічними втулками і скріплено спеціальними шпильками діаметром 2 мм, які проходять через усю конструкцію. Відстань між електродами 1 мм.

Емітером електронів служить оксидний катод непрямого розжарення 1 з діаметром активної поверхні 1,5 мм. За катодом розташовані прискорюючий електрод 2 та вхідний електрод монохроматора 3. Вихідний електрод 4 аналогічний вхідному 3, але центр отвору в ньому для проходження електронного пучка зміщено відносно центру катода і отворів в електродах 2 і 3 по середній дузі між внутрішнім 5 і зовнішнім 6 циліндричними електродами монохроматора на відстань 3 мм. Діаметри отворів в електродах 2-4 однакові і становлять 0,4 мм.

Аналізатор за конструкцією аналогічний монохроматору, але має додатковий електрод 7. Отвори для проходження електронного пучка у вхідних електродах 7 і 8 – круги діаметром 0,8 мм. Щоб забезпечити можливість реєстрації як пружно, так і непружно розсіяних поверхнею електронів отвори в електродах 9 і 12 є щілинами розміром (1×3) мм², розташованими по дузі середнього кола. Така форма щілин у вихідних електродах аналізатора обумовлена тим, що при аналізі непружно розсіяних електронів необхідно компенсувати втрату енергії електронів додатковою різницею потенціалів між вхідним 7 і вихідним 9 електродами аналізатора та зразком. Це призводить до збільшення енергії пучка і відповідно до зменшення

зміщення первинного пучка при проходженні аналізатора. Первинний пучок при зміні енергії переміщується по дузі кола діаметром 6 мм – від 0 до 3 мм, а на колектор розсіяних електронів 15 спочатку попадають пружно розсіяні електрони, а потім електрони, що поступово втрачають свою енергію.

Для отримання додаткової інформації про кутовий розподіл пружно або непружно розсіяних електронів передбачено можливість прикладання між електродами 9 і 12 затримуючого електричного поля та зміна різниці потенціалів між електродами 3, 4 і 7, 9.

Методика вимірювань спектрів зворотного розсіювання повільних електронів детально описана в [5, 8], тому коротко зупинимося лише на основних моментах експерименту та проведених вдосконаленнях. Після одержання необхідного вакууму в камері та температурного обезгажування спектрометра і зразків активується катод. Далі відповідними потенціалами на електродах спектрометра, юстуванням кілець Гельмгольца та підбором напруженості магнітного поля досягається стабілізація електронного пучка на зразок з оптимальним співвідношенням інтенсивності і монокінетичності. Відбиті від поверхні електрони при проходженні області схрещених електричного і магнітного полів у проміжку між циліндричними електродами 10-11 аналізуються за поздовжніми складовими енергії і реєструється колектором 15 (див. рис. 1).

У добре відюстованому спектрометрі струм на зразок 14 і колектор зворотно розсіяних електронів 15 при подачі на зразок запираючого потенціалу є стабільними і не залежать від енергії падаючих електронів (рис. 2).

Після налаштування спектрометра, в залежності від поставленої задачі, ЦАП підключається до відповідних електродів спектрометра. Напруга і тривалість кроку можуть задаватися і змінюватися в широкому діапазоні значень - 10-80 мВ і 1-10 с., відповідно. Реєстрація первинного

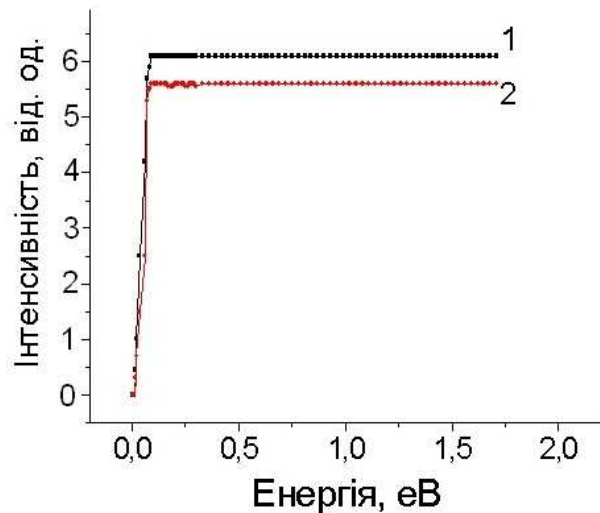


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики ГЕС.

1 – струм на зразок; 2 – струм зворотно відбитих електронів.

(падаючого) та розсіяного пучка електронів здійснюється електрометром В7-30. Система реєстрації дозволяє одночасно вимірювати параметри первинного і розсіяного пучків. ПК керує ЦАПом та режимом вимірювань. Безпосередньо перед проведенням досліджень щоразу визначаються основні параметри спектрометра – моноенергетичність первинного пучка електронів, енергетичне розділення та пропускання аналізатора.

Моноенергетичність первинного електронного пучка – повна ширина на напіввисоті максимуму функції енергетичного розподілу електронів у пучку (FWHM) – визначається диференціюванням початкової ділянки вольт-амперної характеристики струму первинного електронного пучка на зразок. Типовий енергетичний розподіл електронів у первинному пучку представлено на рис. 3.

Енергетичне розділення аналізатора визначається залежністю струму зворотно відбитих електронів на колектор 15 від зміни різниці потенціалів між катодом і вхідним електродом аналізатора 9. Типовий енергетичний розподіл зворотно відбитого електронного пучка від дзеркальної атомно-чистої поверхні Мо показано на рис. 4.

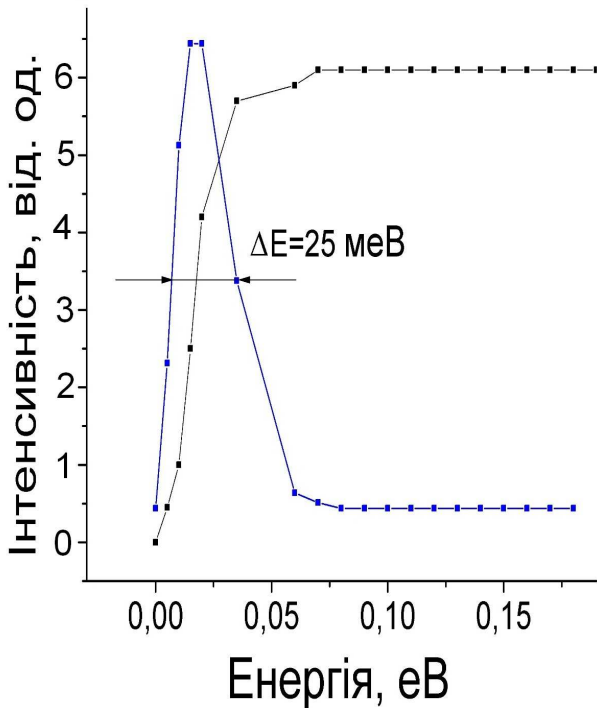


Рис. 3. Типовий енергетичний розподіл інтенсивності первинних електронів.

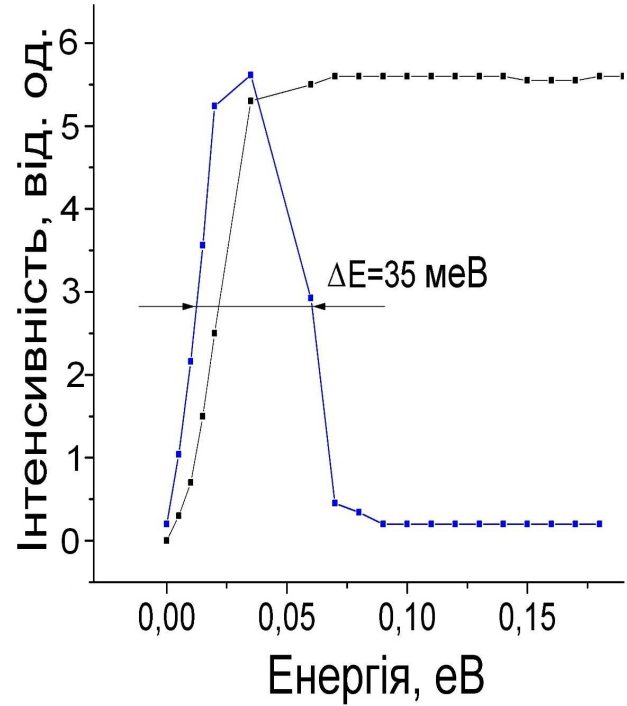


Рис. 4. Типовий енергетичний розподіл інтенсивності розсіяних поверхнею полікристалічного Мо електронів на 180° на колекторі.

Крім того, в процесі досліджень контролюється фоновий струм при проходженні первинного пучка через аналізатор. Для цього зразки відводились з-під електронного пучка, пучок попадав безпосередньо на спеціальний циліндр Фарадея 13, вимірювалась залежність струму на колектор 15 від енергії електронів, що пройшли через аналізатор. Виявилось, що фоновий сигнал не перевищував 1-5% від корисного.

В умовах даного експерименту характеристики спектрометра були наступні: енергія електронного пучка – 0-5 eV, струм первинного електронного пучка – $\sim 10^{-8}$ А, струм відбитого пучка – $\sim 10^{-10}$ - 10^{-11} А, діаметр пучка – $\sim 0,4$ мм, моноенергетичність первинного пучка – ~ 20 - 40 меВ, енергетичне розділення аналізатора – ~ 30 - 50 меВ, ступінь пропускання спектрометра – $\sim 95\%$.

Оптимізація гіпоциклоїдального електронного спектрометра дозволила проводити наступні види експериментів:

1. Вивчати енергетичні залежності інтенсивності пружно розсіяних назад (на 180°) електронів.

2. Вимірювати енергетичні залежності інтенсивності повного розсіювання електронів.
3. Досліджувати спектри енергетичних втрат при різних енергіях первинного пучка.
4. Вивчати порогові спектри, тобто детектувати електрони з постійною залишковою енергією, включаючи практично нульову.
5. Визначати кутовий розподіл відбитих поверхнею електронів при різних енергіях первинного пучка, використовуючи метод затримуючого потенціалу.

В режимі дослідження енергетичної залежності інтенсивності пружно розсіяних на 180° електронів енергія електронів задається різницею потенціалів між електродами 2 - 12 і змінюється від 0 до 10 eV, а потенціали на електродах 8, 9-12 аналізатора (див. рис. 1) встановлюються такими, щоб відсікати непружно розсіяні електрони і фіксувати тільки ті електрони, які не втратили своєї енергії в процесі взаємодії з поверхнею.

При вивченні енергетичних втрат різницею потенціалів між катодом і зразком встановлюється певна енергія падаючих електронів від 0,5 до 5 eV, а зміна різниці потенціалів на аналізаторі (електроди 9-12) визначає долю енергії, втраченої первинним електроном у процесі взаємодії з поверхнею.

При дослідженні спектрів сталого залишкової енергії задається різниця потенціалів між аналізатором 9 і зразком в інтервалі від 0 до ~1 eV та аналізується залежність інтенсивності відбитого пучка від енергії падаючих електронів, що встановлюється різницею потенціалів між катодом і зразком.

При вимірюванні спектрів повного розсіювання на вхідні 7, 8 і вихідні 9, 12 електроди аналізатора прикладається високий (~10 eV) потенціал і визначається залежність інтенсивності струму на зразок від зміни різниці потенціалів між катодом і зразком.

При дослідженні кутового розподілу розсіяних поверхнею електронів застосовується метод затримуючого потенціалу: між електродами аналізатора 7-9 встановлюється високий (~10 В) потенціал, задається певна енергія первинних електронів від 0 до 10 eV (різниця потенціалів між катодом і зразком) і вимірюється залежність зміни інтенсивності струму на зразок від різниці потенціалів між вихідним електродом аналізатора 12 і зразком. Оскільки потенціал між електродами 12 і зразком впливає на поперечну складову швидкості електронів, то похідна цієї залежності буде відтворювати кутовий розподіл відбитих поверхнею електронів. Зазначимо, що при малих енергіях (0,5-2 eV), кутову залежність розсіяних електронів можна визначити з розподілу їх за енергіями, виміряними в режимі спектрів втрат.

Таким чином, оптимізація гіпоциклоїдального електронного спектрометра дозволила значно розширити його функціональні можливості і проводити комплексні систематичні дослідження процесів взаємодії повільних моноенергетичних електронів з конденсованими системами.

Спектри зворотного розсіювання повільних електронів поверхнями молибдену і танталу

Дослідження перехідних металів є актуальними як з теоретичного, так і з експериментального боку, оскільки такі метали відіграють провідну роль у сучасній техніці [9]. Порівняно зі звичайними металами у перехідних металів густина електронних станів значно більша. Це є переконливим доказом участі d-електронів у системі колективізованих електронів цих металів. Крім того, у перехідних металах завжди значно підвищена густина електронних рівнів поблизу поверхні Фермі, а у випадку, коли через некомпенсованість магнітних моментів у кристалі виникає атомний феромагнітний порядок, відбувається зняття спінового виродження, тобто зсув енергетичних зон для колективізованих електронів з різними проєкціями спіну.

Дослідження рентгенівських спектрів поглинання та випромінювання перехідних металів дозволяє стверджувати, що рух внутрішніх електронів у кристалі зберігає свій вигляд, характерний для вільних атомів: локалізація поблизу ядра та лінійний енергетичний спектр. Зовнішні електрони колективізуються, делокалізуючись по всьому об'єму, а їх спектр має вже зонний, а не дискретний характер. Особливості електронної структури таких металів визначають їх магнітні властивості – пара- та феромагнетизм.

За розрахунками Бете в кубічному полі кристала атомний d-рівень розщеплюється на 2 рівні – двох- і трьохкратно вироджені, відповідно, які можуть або перекриватись або бути розділені енергетичною щільною. В роботі [10] розрахована методом лінійних приєднаних хвиль зонна структура Мо була використана для отримання гістограми його оптичної провідності. Вона добре узгоджується з експериментальними результатами, одержаними в роботі [11]. Точно передбачені як положення піків оптичної провідності, так і їх значення. Припускається, що саме цей метод найкраще описує оптичні властивості 4d- та 5d-металів, зокрема молибдену.

Виявлено можливість електронних переходів по всій зоні Бріллюена через велику кількість плоских енергетичних зон. Запропонована одночастинкова картина вимагає корекції біля рівня Фермі, оскільки взаємодія електрон-електрон впливає на оптичні властивості і посилюється з ростом енергії фотонів.

Тантал, як елемент 5-ої групи, має специфічні властивості, що становлять інтерес – міцність та високотемпературну надпровідність ($E_c=4,48K$). Ці особливості Та обумовлені специфікою його електронної структури. Зонна структура танталу розрахована різними методами, зокрема, приєднаних плоских хвиль та емпіричного псевдопотенціалу. Вони дають близькі значення піків густини заповнених станів, форми поверхні Фермі. Розрахунок хвильових функцій електронів біля поверхні Фермі використано при аналізі електрон-фононої взаємодії і розподілу електронного заряду [12].

Порівняно з напівпровідниковими поверхнями поверхні перехідних металів більш складні для теоретичного дослідження через співіснування локалізованих d-електронів та делокалізованих s-, p-електронів. Розрахунки ПЕС та їх порівняння з експериментальними даними наведено для Мо в роботі [13].

Крім того, аналіз літературних даних показує, що найбільш поширеними підложками для конденсації органічних молекул є полікристалічні металічні поверхні (Pt, Au, Ag, Cu, W, Mo, Ta, Ni) [14]. Це обумовлено тим, що, по-перше, поверхні цих металів є найбільш стійкими при конденсації складних органічних сполук і, по-друге, у полікристалічних та аморфних поверхонь тонка структура в електронних спектрах практично відсутня оскільки електронні спектри “усереднені” по різних кристалографічних площинах і особливості густини станів, характерні для кожної грані монокристалів, згладжуються. Всі ці факти зумовлюють інтерес до дослідження властивостей даних металів і, зокрема, процесів взаємодії повільних електронів з їх поверхнями.

Нами досліджено масивні

полікристалічні зразки танталу та молібдену. Вивчено енергетичні залежності інтенсивності пружного розсіювання повільних електронів на 180° , порогові спектри та енергетичні залежності коефіцієнта відбивання електронів поверхнями Мо і Та.

Обидва зразки перед початком вимірів полірувались до дзеркального блиску, очищались спеціальним розчином та промивались в ультразвуковій ванні.

Для отримання наближеної до атомно-чистої поверхні зразків використано метод високотемпературного прогріву. Для цього їх поверхні всередині вакуумної камери при тиску 10^{-7} Па бомбардувалися електронами з енергією 300-600 eV і, таким чином, прогрівалась до температури $\sim 1000\text{—}1050K$. Бомбардування електронами проводилось з тильного боку зразків, що дозволило уникнути руйнування та розпорошення досліджуваних поверхонь. Для одержання необхідного стану поверхні здійснювалось декілька циклів прогрів-охолодження.

Енергетичні залежності інтенсивності електронів, пружно розсіяних на 180° досліджуваними зразками в інтервалі енергій 0-7 eV, представлені на рис. 5.

Калібрування енергетичної шкали електронного пучка здійснювалось за зсувом вольт-амперної характеристики струму електронів на зразок. За нуль шкали приймався максимум функції розподілу електронів за енергіями. Як видно з рисунка, як для танталу, так і для молібдену існує загальна тенденція зменшення інтенсивності пружно відбитих електронів зі збільшенням їх енергії.

Енергетичні залежності коефіцієнтів відбивання електронів поверхнями молібдену і танталу показані на рис. 6.

Як видно з рисунка, для енергетичних залежностей коефіцієнта відбивання електронів досліджуваними поверхнями характерний різкий спад коефіцієнта відбивання в області енергій 0-3 eV, вихід на широкий мінімум в околі 3-5 eV і повільний ріст зі збільшенням енергії падаючих електронів.

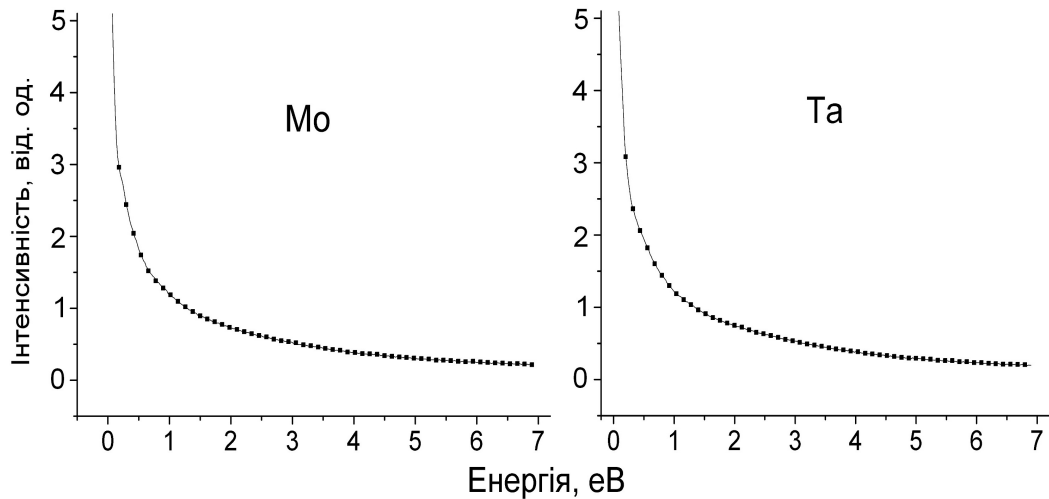


Рис. 5. Енергетичні залежності інтенсивності пружного розсіювання електронів на 180° поверхнями Мо і Та.

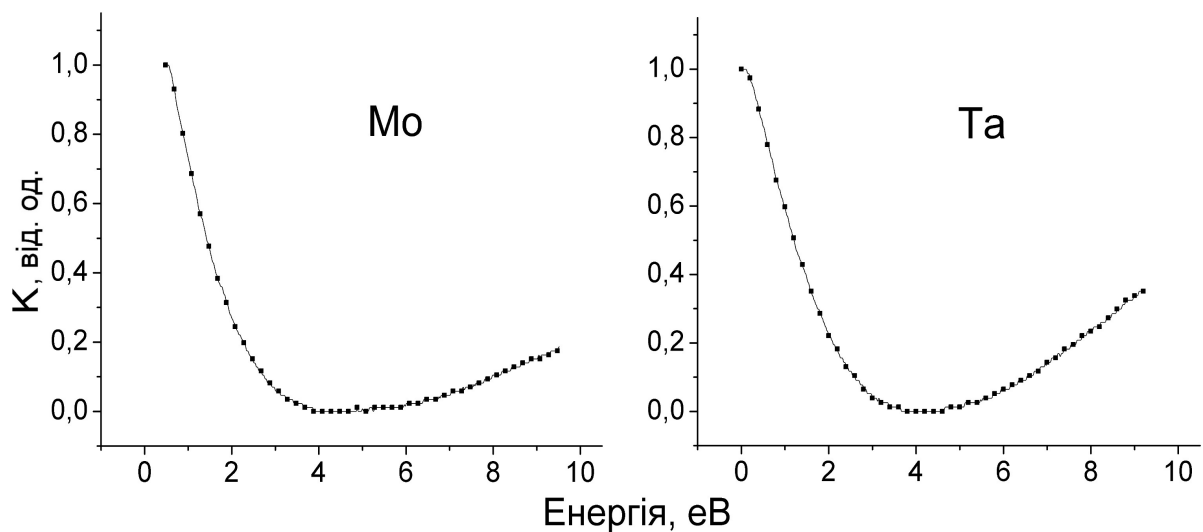


Рис. 6. Енергетичні залежності коефіцієнта відбивання електронів поверхнями Мо і Та.

Спектри сталих залишкових енергій при $E_f=0$ еВ (порогові спектри) виявились більш чутливими до чистоти поверхні зразків. Порогові спектри знімались до та після прогріву досліджуваних зразків електронним пучком у високому вакуумі ($P \sim 10^{-7}$ Па). Одержані спектри для Мо наведені на рис. 7, а для Та – на рис. 8.

Виявлено, що у порогових спектрах обох непрогрітих зразків в області енергій 1,0-3,0 еВ проявляється багата тонка структура, яка в процесі прогріву зразків поступово зникає. Оскільки енергетична локалізація цієї структури для обох зразків є близькою, то, на нашу думку, дані особливості у спектрах обумовлені фізичною адсорбцією залишкових газів.

Мас-спектрометричний аналіз залишкових газів при тиску $P \sim 10^{-7}$ Па показує,

що основний вклад вносять парціальні тиски H_2 , CO , Ar , N_2 , O_2 , CO_2 , вуглеводи, утворені від розкладу або каталізу [15]. Відомо [16-18], що адсорбовані молекули при взаємодії з повільними електронами утворюють поверхневі резонанси. Серед залишкових газів найкраще вивчена адсорбція молекули N_2 , зокрема утворення при взаємодії з повільними електронами резонансного стану $^2\pi_g$ негативного іона адсорбованої молекули N_2^- [19, 20]. Встановлено енергетичне положення – 1,0-3,0 еВ – і форма особливостей, обумовлених цим резонансом, та показано, що він має відносно великий ефективний переріз зворотного розсіювання повільних електронів. Оскільки виявлена нами у спектрах сталих залишкових енергій на непрогрітих зразках Та і Мо в області

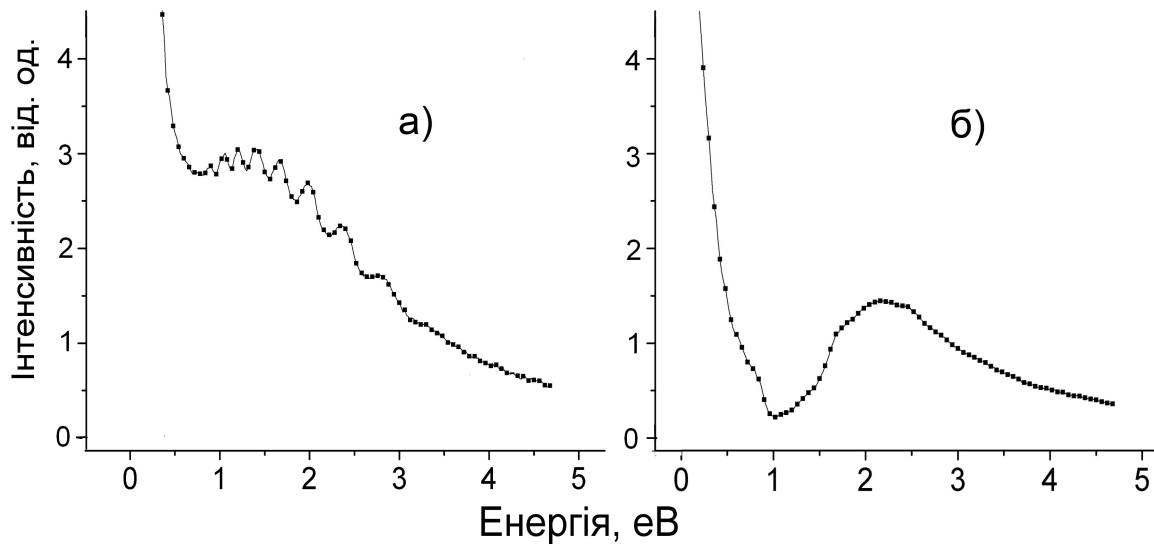


Рис. 7. Порогові спектри молібдену
а) - до прогріву електронним пучком; б) – після прогріву електронним пучком.

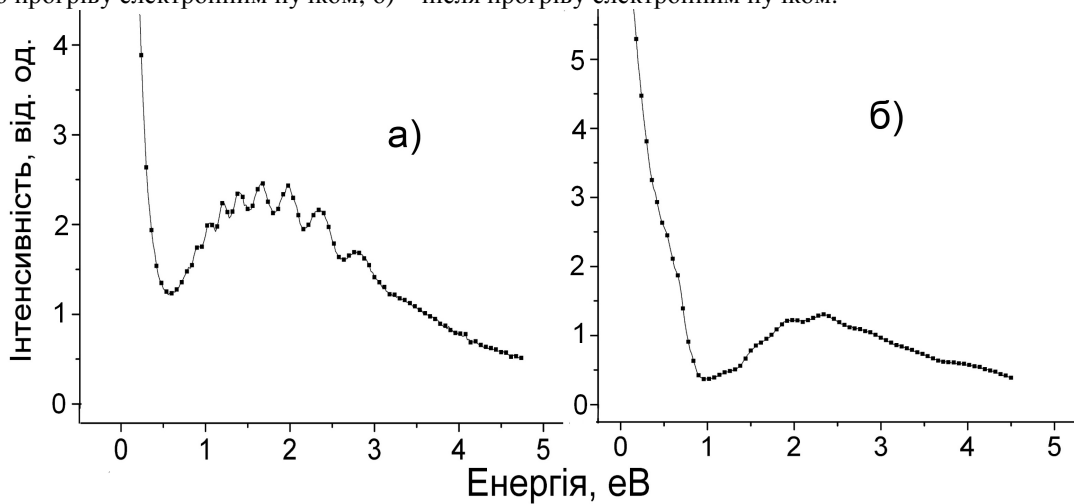


Рис. 8. Порогові спектри танталу
а) - до прогріву електронним пучком; б) - після прогріву електронним пучком.

1,0-3,0 eV тонка структура за своїм енергетичним положенням і формою відповідає збудженню $^2\pi_g$ резонансного стану молекули N_2 , то скоріш за все вона і обумовлена саме утворенням резонансів $^2\pi_g$ фізично адсорбованих на досліджуваних поверхнях молекул N_2 . Слід особливо відмітити, що дослідження проводились протягом одного року. Всі отримані результати добре відтворюються. Похибка визначення енергетичних положень особливою в спектрах є у межах роздільної здатності спектрометра.

Висновки

1. Вдосконалено конструкцію гіпоциклоїдального електронного спектрометра та методика дослідження спектрів

зворотного розсіювання повільних електронів конденсованими системами. Це дозволило вивчати як енергетичні залежності інтенсивності пружно розсіяних на 180° електронів, спектри втрат, спектри сталих залишкових енергій, так і повне розсіювання електронів при взаємодії з поверхнею.

2. Виявлено, що спектри сталих залишкових енергій дуже чутливі до чистоти поверхні полікристалічних металів Мо і Та. Після витримки цих поверхонь в атмосфері залишкових газів при $P \sim 10^{-7}$ Па протягом кількох годин у порогових спектрах з'являється структура, яка за формою і енергетичним положенням відповідає $^2\pi_g$ -резонансному стану молекули азоту N_2^- .

Література

1. Методы анализа поверхности / Под ред. А. Зандерны. - М.: Мир, 1970. - 582 с.
2. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. - М.: Мир, 1989. - 568 с.
3. Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Под ред. Х. Ибаха. - Рига: Зинатне, 1980. - 315 с.
4. Feyer V.M., Popik T.Yu., Shpenik O.B., Popik Yu.V., Erdevdy M.M. Low-energy electron backscattering spectroscopy of Mg/Mo films // J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. - 2002. - V.122. - P. 251-257.
5. Popik T.Yu., Feyer V.M., Shpenik O.B., Popik Yu.V. Low-energy electron spectroscopy of Si(100) and Ge(100) surfaces // Radiation Physics and Chemistry. - 2003. - V.68/1-2. - P. 251-256.
6. Popik T.Yu., Feyer V.M., Shpenik O.B., Popik Yu.V. Effect of Ge(III) surface treatment on low-energy electron backscattering // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. - 2005. - V.7, № 3, - P. 1539-1546.
7. Popik T.Yu., Feyer V.M., Shpenik O.B., Popik Yu.V. Kinetics of residual gas adsorption on Ge(111) surface in low-energy electron backscattering // Applied Surface Science. - 2006. - 252. - P. 3625-3631.
8. Шпеник О.Б., Эрдевиди Н.М., Романюк Н.И., Попик Т.Ю., Завилопуло А.Н. Гипоциклоидальный электронный спектрометр для исследования упругого и неупругого обратного рассеяния электронов атомами, молекулами и поверхностью твердых тел // ПТЭ. - 1998. - Т. 41, № 1.- С. 66-73.
9. Вонсовский С.В., Изюмов Ю.А. Электронная теория переходных металлов // УФН. - 1962. - Т. 77, вып. 3. - С. 377-448.
10. Bong-Soo Kim, Harmon B.N., David W. Lynch. Optical properties of Mo // Phys. Rev. B. - 1989. - V. 39, №9. - P. 5754-5757.
11. Weaver J.H., Lynch D.W., Olson C.G. Optical properties of V, Ta, and Mo from 0.1 to 35 eV // Phys. Rev. B. - 1974. - V.10, (Is.2). - P. 501-516.
12. Alward J.F., Perlov C.M., Fong C.Y. Calculated electronic properties and reflectivity of tantalum // Phys. Rev. B. - 1977. - V.15, № 12. - P. 5724-5732.
13. Legoas S.B., Araujo A.A., Laks B. Self-consistent electronic structures of Mo(001) and W(001) surfaces // Phys. Rev. B. - 2000. - V.61, №15. - P. 10417-10426.
14. Ptasinska S., Sanche L. Dissociative electron attachment to abasic DNA // Phys. Chem. Chem. Phys. - 2007. - 9. - P. 1730-1735.
15. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. - М.: Мир, 1975. - 622 с.
16. Илленбергер Е., Смирнов Б.М. Прилипание электрона к свободным и связанным молекулам // Успехи физических наук. - 1998. - Т.168, №7. - С. 731-766.
17. Sanche Leon. Low-energy electron scattering from molecules on surface // J.Phys. B: At. Mol.Opt. Phys. - 1990. - V.23. - P. 1597-1624.
18. Palmer R.E., Rous P.J. Resonances in electron scattering by molecules on surface // Reviews of Modern Physics. - 1992. - V.64, №2 - P. 383-440.
19. Gerber A., Herzenberg A. Resonance scattering of electron from N₂ adsorbed on a metallic surface // Phys. Rev. B: Condens Matter. -1985. - V.31, №10. - P. 6219-6227.
20. Шпеник О.Б., Романюк Н.И., Чернишова И.В. Резонансная структура при упругом рассеянии электронов на 180° молекулами N₂ и N₂O // Письма в ЖТФ. - 1985. - Т. 41. - Вып. 12. - С. 500-502.

SLOW ELECTRON SCATTERING BY POLYCRYSTALLINE TANTALUM AND MOLYBDENUM SURFACE

O.B. Shpenik, T.Yu. Popik, R.O. Ortikov

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat. Acad. Sci.,
Universytetska Str. 21, Uzhhorod, 88017
e-mail:an@zvl.uzhgorod.ua

A modernized hypocycloidal electron spectrometer is presented as well as new possibilities of the technique for the studies of slow (0–10 eV) electron backscattering by polycrystalline Mo and Ta metal surfaces. The obtained energy dependences of elastic 180° reflection intensity, total reflection coefficient are analyzed as well as threshold spectra at low-energy electron backscattering.

A fine structure in the threshold spectra of the samples under investigation is revealed, resulting from the resonance $^2\pi_g$ state of the N_2 molecule.

Keywords: adsorption, surface, slow electrons, resonance, scattering, electron spectroscopy, electron spectrometer.

РАСSEИВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПОВЕРХНОСТЯМИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТАНТАЛА И МОЛИБДЕНА

О.Б. Шпеник, Т.Ю. Попик, Р.О. Ортиков

Інститут електронної фізики НАН України,
ул. Университетская, 21, Ужгород, 88017
e-mail:an@zvl.uzhgorod.ua

Представлена усовершенствованная конструкция гипоциклоидального электронного спектрометра и новые возможности методики исследования процессов обратного рассеяния медленных (0–10 эВ) электронов поверхностями поликристаллических металлов Мо и Та. Проанализированы полученные энергетические зависимости интенсивности упругого отражения на 180°, коэффициента полного отражения и пороговые спектры при обратном рассеянии электронов низких энергий.

В пороговых спектрах исследуемых образцов выявлено тонкую структуру, обусловленную образованием резонансного состояния $^2\pi_g$ молекулы N_2 .

Ключевые слова: адсорбция, поверхность, медленные электроны, резонанс, рассеивание, электронная спектроскопия, электронный спектрометр.