

## Відгук

Офіційного опонента на дисертаційну роботу Маркуша Павла Павловича “Збудження та іонізація при взаємодії електронів з сіркою і селеном у газовій фазі”, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.04 – фізична електроніка.

Сірка і селен належать до групи халькогенів, характерною особливістю яких є те, що в процесі їх випаровування утворюються не лише атоми, а й молекули з різним числом атомів ( $n = 2-8$ ). Слід зауважити, що молекули, які складаються з понад трьох однакових атомів, можна віднести до кластерних структур, які займають проміжне місце між атомами і молекулами, з одного боку, та твердими тілами – з іншого. Кластери мають особливі фізичні та хімічні властивості. Завдяки цьому вони є перспективними матеріалами для різних сфер науки і техніки.

У роботі здобувача досліджено процеси збудження та іонізації сірки і селену у газовій фазі при взаємодії з повільними електронами високої енергетичної однорідності. Вивчення цих процесів важливо для поглиблення наших уявлень про елементарні процеси зіткнень електронів з атомами та молекулами у газовій фазі. Слід відзначити, що на початок даних досліджень були відсутні експериментальні дані з вивчення повного ефективного перерізу утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки та селену при їх взаємодії з електронами низьких енергій. Стосовно селену частково, а для сірки повністю відсутні експериментальні дані про їх випромінювання в ультрафіолетовій та видимій областях довжин хвиль (200-600 нм) при зіткненні з повільними електронами. Викладені обставини зумовлюють **актуальність** теми досліджень і обґрунтування її вибору.

Дисертаційна робота пов'язана з напрямком наукових досліджень відділу іонних процесів Інституту електронної фізики НАН України та науково-дослідницької теми “Електронна, фотонна та мас-спектрометрія

багатоелектронних атомів та складних молекул при зіткненнях з електронами”.

### ***Достовірність результатів досліджень***

Результати дисертаційної роботи отримані добре апробованими методами і тому сумнівів в їхній достовірності немає. Це експериментальні методи мас-спектрометрії електронного удару, фотонної та електронної спектроскопії у поєднанні з об'ємним методом. Крім того, достовірність отриманих результатів була забезпечена контрольними вимірюваннями, багатократністю вимірів та відтворюваністю результатів. Достовірність результатів також підтверджується узгодженістю отриманих результатів з наявними в літературі даними.

### ***Основні результати роботи, їхня новизна і значимість***

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 100 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 127 сторінок, з яких 97 складають основний текст дисертації. Робота містить 39 рисунків і 6 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано об'єкти досліджень та методи його вивчення, викладено мету і завдання досліджень, наукову новизну, практичне значення результатів, відзначено особистий внесок автора та описано структуру роботи.

У **першому розділі** роботи представлено опис методів, які використовувалися для вивчення іонізації і збудження досліджуваних речовин при взаємодії з електронами низьких енергій, а також розглянуто принцип роботи та конструкції експериментальних приладів монопольного мас-спектрометра, чотири-електродної електронної гармати та гіпоциклоїдального електронного спектрометра. Детально описано методики налаштування експериментальних приладів, проведення вимірів та обробки результатів. Крім того, описано основні параметри експериментальних установок.

У **другому розділі** проаналізовано мас-спектри сірки і селену, а також

енергетичні залежності утворення атомарних і молекулярних іонів досліджуваних речовин.

Цікавим результатом є те, що в процесі випаровування сірки і селену утворюються як атоми, так і молекули речовин, що досліджувались. Також показано, що процеси фрагментації і дисоціативної іонізації мають велике значення при взаємодії електронів з молекулами сірки і селену. Завдяки можливості змінювати енергії електронів іонного джерела мас-спектрометра в межах 0-100 еВ виміряно енергетичні залежності ефективного перерізу утворення іонів, наявних у мас-спектрах сірки і селену та визначено енергії їх появи. Виявлено, що на енергетичній залежності ефективного перерізу утворення іонів сірки і селену проявляються особливості у вигляді зломів та максимумів, що зумовлені включенням нових каналів реакції з ростом енергії іонізуючих електронів. Автором вперше експериментально визначено поріг утворення двозарядного іона  $Se^{++}$  у парах селену при зіткненні з електронами.

**Третій розділ** містить результати досліджень оптичних спектрів випромінювання парів сірки і селену та оптичні функції збудження найбільш інтенсивних атомарних та іонних ліній, а також молекулярних смуг.

Виявлено, що при енергії електронів 8 еВ ефективно збуджуються молекули  $S_2$ , які мають найбільшу концентрацію при температурі при якій спектри оптичного випромінювання були виміряні. Автором показано, що при енергії 50 еВ уже має місце збудження енергетичних рівнів атома та атомарного іона сірки. У спектрах сірки знайдено дві спектральні лінії атома сірки, цікаво зазначити, що автором вперше знайдено та ідентифіковано 26 спектральних ліній атомарного іона сірки.

У випадку селену виявлено що при низькій енергії до 20 еВ ефективно збуджуються молекули  $Se_2$ , а при енергії 50 еВ має місце збудження атома та атомарного іона селену. У спектрах знайдено та ідентифіковано чотири спектральні лінії атома селену та дев'ять спектральних ліній атомарного іона селену.

Завдяки вимірюванням функцій збудження спектральних ліній атомів сірки

і селену автором встановлено, що атоми досліджуваних речовин утворюються в збудженому стані у процесі дисоціативного збудження молекул  $S_2$  і  $Se_2$ .

**Четвертий розділ** присвячено аналізу енергетичних залежностей повного ефективного перерізу утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки і селену при взаємодії з електронами високої моноенергетичності. Автором вперше визначено пороги іонізації сірки і селену електронним ударом. На енергетичних залежностях повних перерізів в біляпороговій області енергій електронів ідентифіковано особливості у вигляді зломів.

Дисертантом також вивчено повний ефективний переріз утворення негативних іонів у парах сірки і селену. Виявлено, що в дослідженій області енергії має місце резонансне захоплення електронів компонентами парів сірки і селену.

До **найважливіших результатів**, одержаних на основі комплексних систематичних експериментальних досліджень збудження та іонізації парів сірки і селену у газовій фазі, слід віднести такі:

- виявлено, що при енергії електронів 8 еВ ефективно збуджуються електронно-коливні рівні  $B^3\Sigma_u^-$  стану молекули  $S_2$ , а при енергії 50 еВ має місце також збудження енергетичних рівнів  $S$  та  $S^+$ ;

- встановлено, що при енергії електронів 20 еВ в основному збуджуються електронно-коливні рівні  $B^3\Sigma_u^-$  стану молекули  $Se_2$ , а при енергії 50 еВ збуджуються також енергетичні рівні  $Se$  та  $Se^+$ ;

- визначено пороги іонізації сірки ( $9.5 \pm 0.1$  еВ) та селену ( $8.2 \pm 0.1$  еВ), що відповідають енергіям появи  $S_2^+$  і  $Se_2^+$ , відповідно;

- вивчено повний ефективний переріз утворення негативних іонів у парах сірки і селену при взаємодії з електронами в діапазоні енергій 0-10 еВ. Виявлено, що в дослідженому діапазоні енергій має місце резонансне захоплення електронів компонентами парів сірки і селену;

- вперше експериментально досліджено енергетичну залежність ефективного перерізу утворення двозарядного іона  $Se^{++}$  у парах селену при

зіткненні з електронами та визначено його енергію появи, що становить  $21.2 \pm 0.2$  eV.

Зроблені автором висновки разом з приведеними в дисертації результатами підтверджують наукову та практичну цінність роботи, а також її новизну.

При загальному позитивному враженні від дисертації, по тексту можна зробити й окремі зауваження:

1. Неповний список скорочень.

2. З яких міркувань вивчались мас-спектри сірки і селену, оскільки вони вивчені у попередніх роботах.

3. Автор не обґрунтовує вибір температури в оптичних дослідженнях парів сірки і селену.

4. При обговоренні оптичних функцій збудження спектральних ліній і смуг автору слід було би проаналізувати внесок каскадних переходів у заселення вихідного рівня.

Ці зауваження жодним чином не применшують значення отриманих результатів та дисертаційної роботи в цілому.

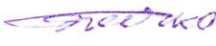
### ***Оцінка роботи в цілому***

Все вище згадане дозволяє зробити висновок, що дисертаційна робота Маркуша П. є завершеним науковим дослідженням, а представлені в роботі результати дають певні внески у фізику парних зіткнень. Основні результати роботи повноцінно відображені у 15 друкованих працях у фахових виданнях (7) і збірниках наукових праць (8) та апробовані на міжнародних і вітчизняних конференціях. Автореферат в повній мірі відображає матеріал, викладений в дисертації. Висновки роботи повністю відповідають поставленим і вирішуваним завданням.

Дисертація написана гарною мовою, викладена грамотно, зрозуміло та послідовно, якісно ілюстрована. Робота містить ґрунтовні пояснення експериментальних вимірювань. Автор успішно освоїв методики проведення експерименту та обробки результатів, що свідчить про глибоке розуміння та

добру кваліфікацію автора.

Вважаю, що за сукупністю та якістю отриманих наукових результатів, їх інтерпретацією, фундаментальною та прикладною цінністю дисертаційна робота “Збудження та іонізація при взаємодії електронів з сіркою і селеном у газовій фазі” повністю відповідає всім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її автор Маркуш Павло Павлович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико математичного наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

доктор фізико-математичних наук, професор,  
заслужений діяч науки і техніки України,  
завідувач кафедри електронних систем ДВНЗ  
“Ужгородський національний університет”.  Опачко І.І.

Підпис д. ф.-м. н. проф. Опачко І.І. підтверджую:

Вчений секретар ДВНЗ

“Ужгородський національний університет”, доцент  Мельник О.О.

