

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.

Дисертаційна робота Маркуша П.П. присвячена вирішенню фундаментальної наукової проблеми вивчення процесів збудження та іонізації сірки і селену у газовій фазі при взаємодії з повільними електронами високої енергетичної однорідності. Ці елементи 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 різноманітних **практичних** застосувань.

Проведені у даній роботі експериментальні дослідження дають змогу глибше зрозуміти елементарні процеси, які відбуваються при взаємодії електронів з сіркою і селеном у газовій фазі, – такі як іонізація, дисоціативна іонізація, фрагментація іонів, утворення негативних іонів через захоплення електронів, збудження енергетичних рівнів атомів, молекул та іонів, що супроводжується випромінюванням фотонів.

Це становить інтерес як для фундаментальних експериментальних та теоретичних досліджень, так і для практичних застосувань у таких, наприклад, актуальних сферах як фізика плазми, фізика пучків позитивних і негативних йонів, плазмохімії. Тому **актуальність** наукової роботи Маркуша П.П. не викликає ніякого сумніву.

Робота виконувалась у відділі іонних процесів Інституту електронної фізики НАН України. Рукопис складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 100 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, вказано об’єкт досліджень та методи його вивчення, викладено мету і завдання досліджень, наукову новизну, практичне значення результатів.

У першому розділі роботи проаналізовано основні аспекти і переваги дослідження елементарних процесів зіткнень при взаємодії електронів з атомами та молекулами використовуючи методів мас-спектрометрії, фотонної та

електронної спектроскопії, а також розглянуто принцип роботи та конструкції експериментальних приладів монопольного мас-спектрометра, чотири-електродної електронної гармати, гіпоциклоїдального електронного спектрометра, які були використані в проведених дослідженнях. Також описано методики налаштування експериментальних приладів, проведення вимірів та обробки результатів.

Другий розділ дисертації присвячений аналізу мас-спектрів сірки і селену, а також аналізу енергетичних залежностей утворення атомарних і молекулярних іонів досліджуваних речовин.

Проведено дослідження мас-спектрів сірки і селену при різних енергіях електронів та температурах ефузійного джерела молекулярного пучка. Ретельний аналіз вимірюваних мас-спектрів сірки і селену дав можливість встановити, що в процесі випаровування утворюються як атоми, так і молекули речовин, що досліджувалися. Встановлено, що процеси фрагментації і дисоціативної іонізації мають велике значення при взаємодії електронів з молекулами сірки і селену. Крім вивчення складу сірки і селену при різних температурах та енергіях електронів, також вимірювалися енергетичні залежності ефективного перерізу утворення атомарних і молекулярних іонів досліджуваних речовин з метою визначення енергії їх появи. Встановлено, що енергетичні залежності ефективного перерізу утворення іонів сірки і селену мають немонотонну поведінку, яка зумовлена включенням нових каналів реакції з ростом енергії іонізуючих електронів. Автором вперше експериментально досліджено енергетичну залежність ефективного перерізу утворення двозарядного іона Se^{++} у парах селену при зіткненні з електронами та визначено енергію його появи.

У **третьому розділі** представлено результати досліджень оптичних спектрів випромінювання парів сірки і селену в різних умовах збудження, наведені оптичні функції збудження найбільш інтенсивних атомарних та іонних ліній, а також молекулярних смуг.

Показано переваги методики фотонної спектроскопії у поєднанні технікою збудження електронним ударом над іншими методиками. Проведено дослідження спектрів оптичного випромінювання парів сірки в діапазоні 270-550 нм при їх збудженні моноенергетичними електронами фіксованих енергій 8, 20 і 50 еВ. Виявлено, що при енергії електронів 8 еВ ефективно збуджуються електронно-коливні рівні $B^3\Sigma^-$ стану молекули S_2 , а при енергії 50 еВ має місце збудження енергетичних рівнів S та S^+ . Завдяки малим кроком сканування довжини хвилі 0.55 нм і спектральним розділенням $\Delta\lambda = 2$ нм, у спектрах знайдено та ідентифіковано 2 спектральні лінії S та 26 спектральних ліній S^+ .

Що стосується селену, показано, що при енергії електронів 20 еВ в

основному збуджуються електронно-коливні рівні $B^3\Sigma^-$ стану молекули Se_2 , а при енергії 50 еВ збуджуються енергетичні рівні Se та Se^+ . У спектрах знайдено та ідентифіковано 4 спектральні лінії Se та 9 спектральних ліній Se^+ .

Ретельний аналіз оптичних функцій збудження спектральних ліній атомів сірки і селену дав змогу однозначно встановити, 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.

Досліджено повний ефективний переріз утворення позитивних іонів у парах сірки і селену. Визначено пороги іонізації досліджуваних речовин з великою точністю завдяки високій моноенергетичності електронного пучка гіпоциклоїдального електронного спектрометра. На енергетичних залежностях повних перерізів в біляпороговій області енергій електронів ідентифіковано особливості у вигляді зломів.

Автором 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.

У висновках сформульовані основні наукові результати, отримані в дисертації.

Підсумовуючи сказане вище, можна констатувати, що дисертантом отримано низку нових і цікавих наукових результатів. Дисертант виконав широкий комплекс систематичних експериментальних досліджень збудження та іонізації парів сірки і селену у газовій фазі.

До дисертації П.П. Маркуша можна висловити деякі зауваження:

- Для селена не досліджено його мас-спектри при різних енергіях електронів, так як це було зроблено у випадку сірки.
- У мас-спектрі сірки виявлено двозарядний атомарний іон сірки, однак не виміряно енергетичну залежність його ефективного перерізу утворення.
- Повні перерізи утворення позитивних і негативних іонів у парах сірки і селену не отримані в абсолютних одиницях.
- Спектри оптичного випромінювання парів селену було виміряно при енергіях 20, 30 і 50 еВ. На мою думку було би доцільно виміряти спектр селену при більш низьких енергіях (10 еВ), як це було зроблено у випадку сірки.

Разом з тим, наведені зауваження не можуть вплинути на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи та не змінюють думки про наукову

обґрунтованість і достовірність положень і висновків дисертації.

Автореферат розкриває основні положення й результати, що захищаються, правильно передає зміст дисертаційної роботи.

Основні результати в достатній мірі опубліковані в міжнародних наукових журналах та представлені на наукових конференціях. **Достовірність** отриманих в дисертації результатів базується на комплексному використанні сучасних експериментальних методик. Зроблені в роботі висновки логічно впливають з викладеного в дисертації матеріалу. Загалом, дисертаційна робота написана на високому науковому рівні, грамотно, із зрозумілими висновками.

Дисертація П.П. Маркуша являє собою **закінчену науково-дослідницьку роботу**, яка виконана на сучасному рівні і присвячена розв'язанню актуальних проблем фізики елементарних процесів. Результати роботи в сукупності вирішують наукову проблему дослідження процесів утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки і селену методами мас-спектрометрії і електронної спектроскопії, а також збудження досліджуваних речовин методом фотонної спектроскопії. Отримані наукові результати роблять значний внесок у розвиток сучасної фізики парних зіткнень між електронами та складними атомними системами.

На основі проведеного вище аналізу вважаю, що дисертаційна робота **“Збудження та іонізація при взаємодії електронів з сіркою і селеном у газовій фазі”**, за значенням і новизною отриманих наукових результатів задовольняє усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, а її автор Маркуш Павло Павлович безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичного наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
професор, головний науковий співробітник
Інституту фізики НАН України



О.А.Гончаров



ВІРНО
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
ІФ НАН УКРАЇНИ
В.С.МАЯЖАРА

