

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”

Маркуш Павло Павлович

УДК 537.563.2, 539.186, 543.51

**ЗБУДЖЕННЯ ТА ІОНІЗАЦІЯ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ
З СІРКОЮ І СЕЛЕНОМ У ГАЗОВІЙ ФАЗІ**

спеціальність 01.04.04 – фізична електроніка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Ужгород-2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у відділі іонних процесів Інституту електронної фізики Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор,
академік Національної академії наук України
Шпеник Отто Бартоломійович,
головний науковий співробітник Інституту електронної
фізики НАН України.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Опачко Іван Іванович,
ДВНЗ “Ужгородський національний університет” МОН
України, завідувач кафедри електронних систем;

доктор фізико-математичних наук, професор
Гончаров Олексій Антонович,
провідний науковий співробітник Інституту
фізики НАН України.

Захист відбудеться “3” листопада 2017 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 61.051.01 у ДВНЗ “Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України за адресою: 88000, м. Ужгород, вул. Волошина, 54, ауд. 181.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДВНЗ “Ужгородський національний університет” (м. Ужгород, вул. Університетська, 14).

Автореферат розіслано “29” вересня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 61.051.01
доктор фіз.-мат. наук, професор



Грабар О.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Елементарні процеси парних зіткнень включають в себе всі процеси, які відбуваються при взаємодії електронів, фотонів, іонів, збуджених частинок і радикалів з атомами та молекулами у газовій фазі. Серед цих процесів особливо важливими є пружне розсіювання електронів, утворення негативних іонів, збудження енергетичних рівнів та одно- і багатократна іонізація при зіткненнях електронів з атомами і молекулами. Варто зазначити, що вказані процеси мають місце в широкому діапазоні енергій – від сотих долей електронвольта до сотень кілоелектронвольтів. **Фундаментальне значення** дослідження вищезазначених процесів полягає у поглибленні наших уявлень про елементарні процеси зіткнень електронів з атомами та молекулами у газовій фазі.

Вивчення утворення позитивних та негативних атомарних і молекулярних іонів електронним ударом надає багато важливої інформації про різні процеси, які відбуваються при взаємодії електронів з атомами чи молекулами. З вимірюваних енергетичних залежностей повного перерізу утворення позитивних та негативних іонів можна отримати такі параметри взаємодій як енергія іонізації, енергія появи фрагментів, енергії збуджених енергетичних рівнів іонів та енергії резонансів, пов'язаних із захопленням електронів. Використовуючи мас-спектрометри як аналізуючі прилади, можна одержати не лише якісну інформацію про склад різних речовин у газовій фазі, але й виявити процеси утворення їх фрагментів внаслідок взаємодії з електронами. Вивчення випромінювання фотонів атомами та молекулами при їх збудженні електронним ударом також є дуже важливим для розширення нашого знання про елементарні процеси зіткнень. Вимірюючи спектри оптичного випромінювання та функції збудження атомів, молекул та іонів, можна з великою точністю визначити їх збуджені рівні.

Отримані дані про перераховані вище процеси є особливо важливими для таких сфер фізики як астрофізика, плазма природного та штучного походження, біофізика, біотехнологія, нанотехнологія тощо. Абсолютні величини ефективних перерізів збудження та іонізації, а також якісні характеристики елементарних взаємодій різних мішеней з електронами низьких енергій мають велике значення для теоретичного моделювання ряду процесів, що мають місце в плазмі та атмосферних явищах. Це все зумовлює **прикладне значення** дослідження елементарних процесів взаємодії електронів з різними речовинами у газовій фазі.

У цій роботі були досліджені процеси збудження та іонізації сірки і селену у газовій фазі при взаємодії з повільними електронами високої енергетичної однорідності. Слід зауважити, що 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 ($n = 2-8$) [1*, 2*]. Якраз в цьому полягає складність вивчення елементарних процесів зіткнень електронів з сіркою і селеном у газовій фазі. Саме тому на початок наших 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 дослідження і обґрунтування її вибору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у відділі іонних процесів Інституту електронної фізики НАН України. Наші дослідження були пов'язані з основними науковими напрямками діяльності інституту і виконувалися у рамках науково-дослідницької теми, затвердженої розпорядженням Бюро Відділення фізики і астрономії НАН України:

“Електронна, фотонна та мас-спектрометрія багатоелектронних атомів та складних молекул при зіткненнях з електронами” – 2014-2018 рр., № Держреєстрації 0109U001498.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягала в отриманні нових даних про елементарні процеси, які мають місце при взаємодії електронів низьких енергій з сіркою та селеном у газовій фазі.

Для досягнення поставленої мети в процесі виконання роботи необхідно було вирішити такі **технічні та наукові завдання**:

1. Здійснити модернізацію вакуумної системи експериментальної установки з гіпоциклоїдальним електронним спектрометром.

2. Провести виміри мас-спектрів сірки і селену у газовій фазі при різних енергіях електронів та температурах робочих речовин.

3. Одержати енергетичні залежності ефективного перерізу утворення атомарних та молекулярних іонів сірки і селену в діапазоні енергій зіткнень 8-20 еВ з подальшим їх аналізом.

4. Провести виміри енергетичних залежностей повного ефективного перерізу утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки і селену у діапазонах енергій зіткнень від порогу до 16 еВ – для позитивних іонів і від 0 до 10 еВ – для негативних іонів.

5. Одержати спектри оптичного випромінювання парів сірки і селену при різних енергіях електронів та виміряти оптичні функції збудження окремих атомних і іонних ліній та молекулярних смуг.

Об'єкт дослідження: процеси утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки і селену при зіткненні з електронами, а також збудження енергетичних рівнів атомів та молекул сірки і селену, що супроводжуються випромінюванням фотонів.

Предмет дослідження: мас-спектри сірки і селену, енергетичні залежності повного перерізу утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки і селену, а також спектри оптичного випромінювання парів сірки і селену при зіткненні з електронами низької енергії.

Методи дослідження: мас-спектрометрія електронного удару та метод молекулярного й електронного пучків, що перетинаються під кутом 90° , електронна та фотонна спектроскопія у поєднанні з об'ємним методом, який полягає у проходженні електронного пучка через комірку, наповнену парами досліджуваної речовини.

Наукова новизна результатів, одержаних у цій роботі, полягає в такому:

1. Досліджено спектри 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 $V^3\Sigma_u^-$ стану молекули S_2 , а при енергії 50 еВ має місце також збудження енергетичних рівнів S та S^+ .

2. Вивчено спектри оптичного випромінювання парів селену в діапазоні 200-590 нм при їх збудженні моноенергетичними електронами фіксованих енергій 20, 30 і 50 еВ. Встановлено, що при енергії електронів 20 еВ в основному збуджуються електронно-коливні рівні $V^3\Sigma_u^-$ стану молекули Se_2 , а при енергії 50 еВ збуджуються також енергетичні рівні Se та Se^+ .

3. Досліджено повний ефективний переріз утворення позитивних іонів у парах сірки і селену при взаємодії з електронами у діапазоні енергій від порогу до 16 еВ. Визначено пороги іонізації сірки (9.5 ± 0.1 еВ) та селену (8.2 ± 0.1 еВ), що відповідають енергіям появи S_2^+ і Se_8^+ , відповідно.

4. 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.

5. 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 ± 0.2 еВ.

Достовірність отриманих результатів була забезпечена сучасним рівнем техніки експерименту, ретельною розробкою методики досліджень, контрольними вимірюваннями, багатократністю вимірів та відтворюваністю результатів.

Наукове значення одержаних результатів. Одержані у нашій роботі результати 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. Одержані експериментальні результати допоможуть краще зрозуміти, як змінюється склад парів сірки і селену при різних температурах випаровування.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що представлені у роботі встановлені закономірності та нові дані можуть бути використані:

- при аналізі емісійних спектрів плазмових джерел випромінювання;
- в аналітичній техніці;
- при розробці нових технічних пристроїв та технологій контролю якості і складу компонентів навколишнього середовища;
- для розробки нових та покращання відомих теоретичних моделей взаємодії електронів зі складними атомними системами.

Особистий внесок здобувача у виконання досліджень, які склали основу дисертаційної роботи, є таким:

- здійснено модернізацію вакуумної системи установки з гіпоциклоїдальним електронним спектрометром, що дало змогу суттєво стабілізувати експериментальні умови вимірів і тим самим підвищити надійність одержуваних даних;
- автору належить провідна роль у підготовці та проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, аналізі та інтерпретації отриманих результатів;
- здобувачу належить провідна роль у представленні результатів на конференціях та підготовці публікацій.

Спільно проведено із співробітниками Інституту електронної фізики НАН України: експериментальне дослідження мас-спектрів сірки та селену у газовій фазі – з д.ф.-м.н. А.М. Завілопуло, провідним інженером М.І. Микитою та аспіранткою О.В. Пилипчинець; вимірювання енергетичних залежностей повного ефективного перерізу утворення позитивних та негативних іонів у парах сірки та селену – з к.ф.-м.н. Є.Є. Контрошом, д.ф.-м.н. О.Б. Шпеником та к.ф.-м.н. І.В. Чернишовою; вивчення спектрів випромінювання парів сірки і селену та оптичних функцій збудження атомних і іонних ліній та молекулярних смуг – з к.ф.-м.н. М.М. Ердевді, провідним інженером В.В. Звенігородським та д.ф.-м.н. О.Б. Шпеником.

Автором самостійно написані наукові роботи [1, 10]; йому належить основний внесок у написанні робіт [2, 8-11]; написано спільно з А.М. Завілопуло, О.Б. Шпеником, М.І. Микитою та О.В. Пилипчинець роботи [3, 14, 15]; з М.М. Ердевді, В.В. Звенігородським та О.Б. Шпеником – роботи [4-6, 12, 13]; з О.Б. Шпеником, М.М. Ердевді, Є.Є. Контрошом та І.В. Чернишовою – роботу [7].

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, що представлені в цій роботі, доповідалися та обговорювалися на: науковій конференції “Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії” (м. Ужгород, 2012 р.); міжнародній конференції молодих вчених та аспірантів “ІЕФ-2013” (м. Ужгород, 2013 р.); міжнародній конференції з фізики електронних, фотонних і атомних зіткнень “ICPEAC XXVIII” (м. Ланьчжоу, Китай, 2013 р.); міжнародній конференції з елементарних процесів в атомних системах “SERAS 2014” (м. Братислава, Словаччина, 2014 р.); європейській конференції з атомів, молекул і фотонів “ЕСАМР 12” (м. Франкфурт-на-Майні, Німеччина, 2016 р.); міжнародній конференції молодих вчених та аспірантів “ІЕФ-2017” (м. Ужгород, 2017 р.).

Публікації. Результати експериментальних досліджень, що представлені у роботі, опубліковані у 15 наукових працях, з них 7 статей у фахових журналах та 8 тез на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** представлені актуальність, мета і завдання дисертаційного дослідження, показані новизна, практична і наукова значимість результатів, які одержані у роботі, а також апробація роботи й особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** роботи проаналізовані основні аспекти і переваги дослідження елементарних процесів зіткнень при взаємодії електронів з атомами та молекулами з використанням методів мас-спектрометрії, фотонної та електронної спектроскопії, а також розглянуті принцип роботи та конструкції експериментальних приладів: монопольного мас-спектрометра, чотириелектродної електронної гармати, гіпоциклоїдального електронного спектрометра, які були використані в цій роботі.

Крім того, описані основні параметри експериментальних установок з монопольним мас-спектрометром, чотириелектродною електронною гарматою і гіпоциклоїдальним електронним спектрометром:

- монопольний мас-спектрометр: енергія іонізуючих електронів $E = 5-100$ еВ; моноенергетичність електронного пучка $\Delta E_{1/2} = 400-600$ меВ; струм електронного пучка $I = 0.1-1.0$ мА; густина пучка досліджуваної речовини $n \sim 10^{10}-10^{11}$ см⁻³; робочий вакуум $P = 8 \cdot 10^{-5}$ Па;

- чотириелектродна електронна гармата: діапазон енергій електронів $E = 0-50$ еВ; моноенергетичність електронного пучка $\Delta E_{1/2} = 400-500$ меВ; струм електронного пучка $I = 5-30$ мкА; тиск досліджуваної речовини у камері зіткнень $\sim 10^{-3}$ Па; робочий вакуум $P = 8 \cdot 10^{-4}$ Па;

- гіпоциклоїдальний електронний спектрометр: діапазон енергій електронів $E = 0-35$ еВ; моноенергетичність електронного пучка $\Delta E_{1/2} = 100-200$ меВ; струм електронного пучка $I = 100-300$ нА; тиск досліджуваної речовини у камері зіткнень $\sim 10^{-3}$ Па; робочий вакуум $P = 8 \cdot 10^{-4}$ Па.

Також описані методики налаштування експериментальних приладів, проведення вимірів та обробки результатів. Максимальна сумарна невизначеність для основної частини одержаних даних не перевищувала 3%.

Другий розділ дисертації присвячений аналізу мас-спектрів сірки і селену при різних енергіях електронів та температурах, а також аналізу енергетичних залежностей утворення атомарних і молекулярних іонів досліджуваних речовин.

На рис. 1 наведено мас-спектр сірки, який виміряно при енергії електронів, що налітають, 70 еВ і при температурі ефузійного джерела 380 К. Як бачимо з рис. 1, у мас-спектрі найбільшу інтенсивність мають піки молекулярних іонів S_2^+ і S_8^+ , а інтенсивність піку атомарного іона S^+ становить тільки 33.7% відносно S_2^+ . Напевно, іони S_2^+ і S^+ утворюються переважно внаслідок дисоціативної іонізації молекули S_8 , яка має найбільшу концентрацію при цій температурі. У мас-спектрі чітко виділяються піки ізотопів атома та молекул сірки. Це свідчить про достатньо високу роздільну здатність нашого приладу. Зазначимо, що в нашому спектрі спостерігається також пік при 16 а.о.м., що відповідає двозарядному атомарному іону сірки.

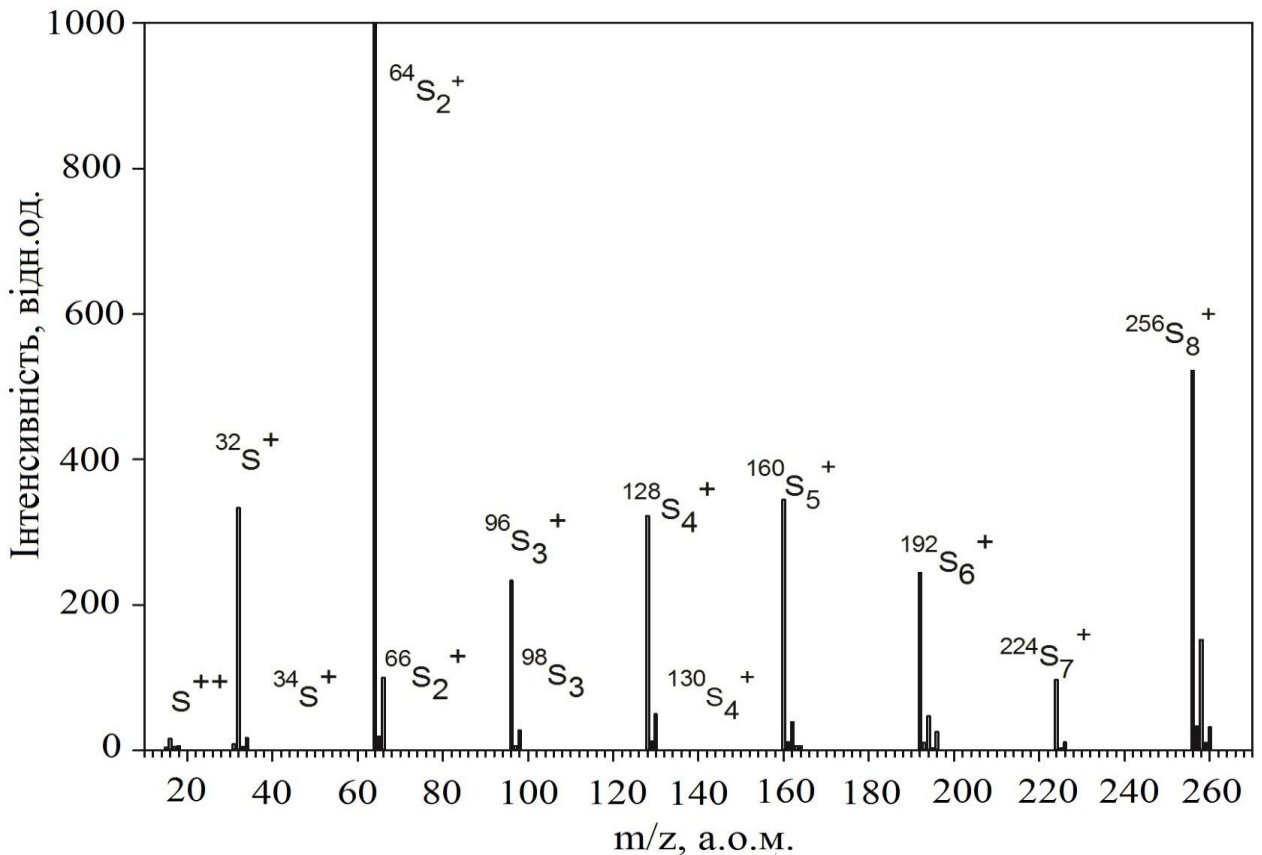


Рис. 1. Мас-спектр сірки при енергії електронів 70 еВ.

Мас-спектри сірки також виміряно при різних енергіях електронів. Це дуже важливо для розуміння природи іонізації різних фрагментів і перерозподілу кількості утворення фрагментних іонів. Аналіз цих мас-спектрів показав, що в процес утворення S_2^+ та S^+ із збільшенням енергії електронів включаються нові канали дисоціативної іонізації молекул S_n ($n = 3-8$), збільшуючи інтенсивність їх утворення. Пік іона S_2^+ має найбільшу інтенсивність при енергії електронів 70 еВ, а при 90 еВ інтенсивність його піку уже починає спадати. Це свідчить про те, що вище енергії 70 еВ здійснюється фрагментація іонів S_2^+ , що підтверджується зростанням інтенсивності піку іонів S^+ . Також можна констатувати, що S_2^+ є досить стабільним, оскільки при енергії 90 еВ він ще присутній у спектрі мас.

Нами було виміряно температурні залежності утворення іонів S_n^+ ($n = 1-6$) при зміні температури сірки в діапазоні 300-700 К і постійній температурі камери іонізації. Інтенсивність утворення окремих іонів значно зростає з температурою, а відношення їх інтенсивностей при різних температурах змінюється. На всіх залежностях спостерігається максимум при температурі близько 450 К, що найбільш імовірно пов'язаний з термічним руйнуванням кристалічної ґратки сірки та розривом кільця молекули S_8 з утворенням відкритих ланцюжків атомів. Утворення молекули S_8 зі структурою відкритого ланцюжка може дати пояснення суттєвого зростання інтенсивності піків іонів S_2^+ та S^+ , оскільки зв'язки між атомами в таких молекулах є більш слабкими, через те що розрив їх зв'язку при взаємодії з електронами відбувається більш ефективно. Що стосується іонів S_3^+ , S_4^+ , S_5^+ і S_6^+ , то вони мають подібну поведінку до температури 570 К. Вище від цієї температури інтенсивність утворення іонів S_6^+ зростає повільніше, ніж для інших іонів. Це пояснюється тим, що із збільшенням температури включаються нові фрагментаційні канали S_6^+ , які призводять до зменшення інтенсивності його утворення і разом з тим – до утворення нових фрагментних іонів S^+ , S_2^+ , S_3^+ , S_4^+ і S_5^+ .

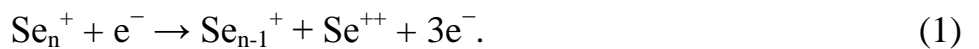
Мас-спектр селену виміряно при енергії електронів 70 еВ та температурі 470 К. У мас-спектрі селену наявні атомарний іон Se^+ та молекулярні іони Se_2^+ , Se_3^+ і Se_4^+ , серед яких пік іона Se_2^+ має найбільшу інтенсивність. На відміну від сірки, у випадку селену молекули Se_6 домінують у його парах при низьких температурах. З цього випливає, що велика інтенсивність піку іонів Se_2^+ у нашому мас-спектрі має місце завдяки дисоціативній іонізації молекули Se_6 . Група піків невеликої інтенсивності близько 40 а.о.м. відповідає двозарядному іону селену Se^{++} та його ізотопам. Низька інтенсивність піку цього іона свідчить про те, що його утворення є малоймовірним при енергії електронів 70 еВ. Шість існуючих ізотопів атома селену також спостерігаються у мас-спектрі, і їх піки добре відділяються від піків основного іона. Слід зазначити, що інтенсивність піків ізотопів збільшується зі зростанням числа атомів у молекулах. Цікаво, що це явище не спостерігалось нами у випадку сірки.

Нами було виміряно температурні залежності утворення іонів Se_n^+ ($n = 1-4$) при зміні температури ефузійного джерела в діапазоні 420-500 К і постійній температурі камери іонізації. Вивчення термодинамічних особливостей селену в широкому інтервалі температур проводилося в багатьох роботах, однак більшість досліджень було виконано в температурному діапазоні вище 500 К. Тому нами вивчено температурну залежність утворення іонів селену при низьких температурах. На всіх залежностях спостерігається сильне зростання інтенсивності близько температури 440 К, що свідчить про включення нових процесів, які ведуть до зростання кількості утворених іонів. Оскільки при низькій температурі молекула Se_6 має найбільшу концентрацію у парах селену, можна вважати, що це явище пов'язане з розпадом саме цієї молекули. Теоретичні розрахунки показали, що кільцева форма молекули Se_6 є найбільш стабільною. Тому можна припустити, що при температурі 440 К здійснюється трансформація кільцевої структури, в результаті чого молекула більш ефективно фрагментується при взаємодії з електронами.

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 їх енергії появи. Встановлено, що енергетичні залежності мають немонотонну поведінку, яка зумовлена включенням нових каналів реакції із збільшенням енергії електронів, що налітають. Особливості, які з'являлися на енергетичних залежностях у формі зломів та максимумів, також були ідентифіковані нами. Наприклад, у випадку ефективного перерізу утворення атомарного іона сірки встановлено, що при енергії 13.8 eV відбувається процес дисоціативної іонізації молекули S_2 з утворенням цього іона.

У нашій роботі вперше виміряно енергетичну залежність ефективного перерізу утворення двозарядного атомарного іона Se^{++} . Методом найменших квадратів було визначено енергію появи цього іона, що становить 21.2 ± 0.2 eV. Найбільш ймовірно двозарядний іон Se^{++} утворюється внаслідок фрагментації іона молекули селену Se_n^+ з n числом атомів згідно з реакцією:



Слід зазначити, що ефективний переріз утворення іонів Se^{++} після порогу монотонно зростає до енергії 29 eV, де він досягає максимальної інтенсивності і виходить в насичення. На наш погляд, особливості на вимірній кривій у вигляді зломів при енергіях 22.5, 25 і 27 eV свідчать про збудження енергетичних рівнів двозарядного іона селену.

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.

На рис. 2 наведено одержані спектри оптичного випромінювання парів сірки в діапазоні 270-550 нм при їх збудженні моноенергетичними електронами фіксованих енергій 8, 20 і 50 eV. Температура резервуара з сіркою підтримувалася сталою в околі 330 К. Як бачимо, спектри є досить складними, і зі зміною енергії збудження вони ускладнюються – на них з'являються нові дискретні лінії, особливо в діапазоні 480-550 нм. Аналіз спектра, виміряного при 8 eV, показав, що немає жодної лінії, яку можна віднести до збудження енергетичних рівнів атомарної сірки. Тому можна констатувати, що вимірний спектр пов'язаний зі збудженням молекул сірки. Як показали наші мас-спектроскопічні дослідження, при вказаній вище температурі найбільш ефективно утворюються молекулярні іони S_2 , тому можна припустити, що аналізований спектр з великою ймовірністю зумовлений збудженням двоатомних молекул сірки. Виявлено, що у спектрі молекулярні смуги утворюються в результаті збудження електронно-коливних рівнів $V^3\Sigma_u^-$ стану молекули S_2 [3*].

У спектрі, виміряному при 20 eV, спостерігається зменшення інтенсивності смуг молекули S_2 . Крім того, в області довжин хвиль 480-550 нм з'являються нові особливості у вигляді ліній. Це свідчить про збудження енергетичних рівнів атома та атомарного іона сірки, які в попередньому спектрі були відсутні, оскільки енергія електронів не була достатньою для їх збудження. У цьому спектрі нами ідентифіковано додатково дві лінії, що належать атомарній сірці, а саме при довжинах хвиль $\lambda = 469.6$ нм ($3s^2 3p^3(^4S^0)4s - 3s^2 3p^3(^4S^0)5p$) та $\lambda = 528$ нм

$(3s^23p^3(^4S^0)4s-3s^23p^3(^4S^0)5p)$. Пороги збудження цих ліній з основного стану сірки становлять 9.16 і 9.21 еВ, відповідно.

Спектр, який виміряний при 50 еВ, значно відрізняється від двох попередніх спектрів як за формою, так і за структурою. У ньому наявна велика кількість нових ліній. Із 27 ліній, що спостерігаються у цьому спектрі випромінювання, 26 ідентифіковано нами як збудження енергетичних рівнів атомарного іона сірки (див. табл. 1). Звідси випливає, що при енергії 50 еВ переважно утворюються атомарні іони сірки у збудженому стані в результаті взаємодії електронів з парами сірки.

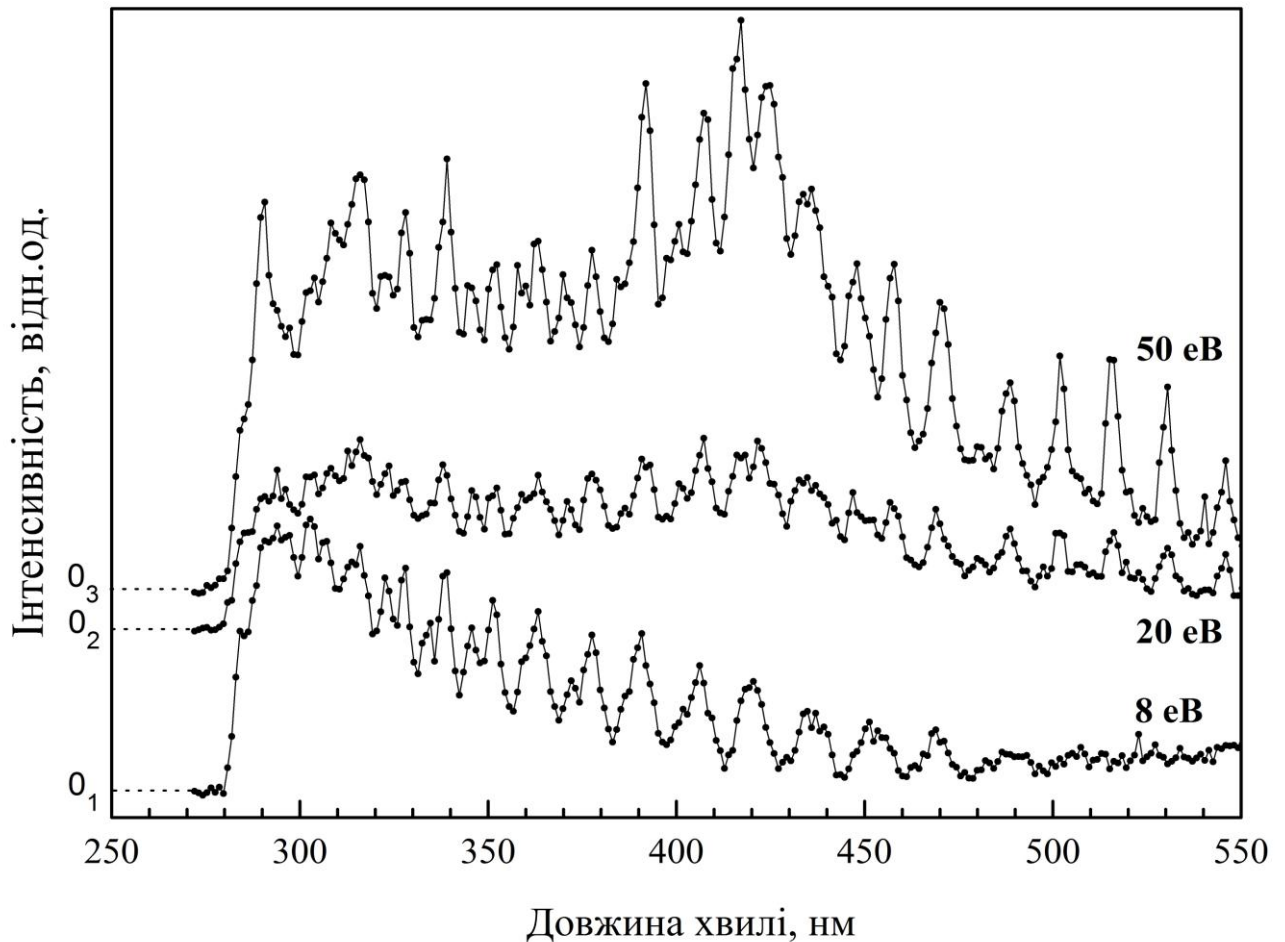


Рис.2. Спектри випромінювання парів сірки при енергіях електронів 8, 20 і 50 еВ.

Спектри випромінювання парів селену були виміряні в області 200-590 нм і при енергіях електронів 20, 30 і 50 еВ. Температура резервуара з селеном підтримувалася сталою в околі 440 К. На відміну від спектрів сірки, на спектрах селену спостерігається широка суцільна смуга в області 300-550 нм, яку можна розділити на дві смуги з максимумами 310-320 нм і 400-420 нм.

Спектроскопічна ідентифікація ліній атомарного іона сірки, що спостерігаються у спектрі випромінювання при енергії електронів 50 еВ.

λ , нм (наші результати)	λ , нм [3*]	Енергія верхнього рівня, еВ [3*]	Переходи
290.4	288.6	19.4	$3s^23p^2(^1D)4s-3s^23p^2(^1S)4p$
315.6	314.7	21.3	$3s^23p^2(^1D)3d-3s^23p^2(^1D_2)4f$
322.4	321.4	20.1	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^1D)5s$
327.4	328.6	20.0	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P_2)4f$
339.2	339.7	19.9	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P_1)4f$
345.8	346.6	19.8	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)4d$
351.7	352.7	21.4	$3s^23p^2(^1D)3d-3s^23p^2(^1D_2)4f$
359.3	358.4	20.0	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P_2)4f$
362.7	362.6	20.0	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P_2)4f$
370.0	370.8	19.6	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P)5p$
377.8	378.1	19.9	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P_1)4f$
392.0	393.4	19.4	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)4d$
400.5	400.5	19.0	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)4d$
407.2	406.6	16.2	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P)4p$
416.4	415.3	18.9	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)4d$
424.8	425.1	20.4	$3s^23p^2(^1D)4p-3s^23p^2(^1D)4d$
434.9	434.4	18.7	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)5s$
448.3	446.5	18.7	$3s^23p^2(^1D)3d-3s^23p^2(^3P_2)4f$
457.6	456.3	19.9	$3s^23p^2(^1D)3d-3s^23p^2(^3P_1)4f$
470.2	470.2	18.8	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)5s$
481.0	480.5	16.2	$3s^23p^2(^3P)4s-3s^23p^2(^3P)4p$
488.6	488.5	16.5	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)5s$
502.1	502.8	15.6	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P)4p$
515.5	514.4	15.6	$3s^23p^2(^3P)3d-3s^23p^2(^3P)4p$
540.7	540.2	18.8	$3s^23p^2(^3P)4p-3s^23p^2(^3P)5s$
545.7	545.5	15.9	$3s^23p^2(^3P)4s-3s^23p^2(^3P)4p$

Виявлено, що суцільна смуга утворюється внаслідок збудження електронно-коливних рівнів $V^3\Sigma^-$ стану молекули Se_2 , які, подібно до сірки, збуджуються дуже ефективно серед низькорозташованих станів. Однак не можна виключати можливість збудження C і E станів молекули Se_2 або станів інших молекул Se_n , які присутні в парах селену при цій температурі. Відмінність спектрів селену від спектрів сірки, де чітко розділяються молекулярні смуги, можна пояснити накладанням смуг від збудження різних станів молекули Se_2 , а також молекул Se_n з більшим числом атомів n. Крім того, оскільки відстань між коливними рівнями Se_2 значно менша, ніж у молекули сірки S_2 , роздільна здатність нашої установки не дала змогу розділити коливну структуру.

На спектрі, виміряному при енергії електронів 20 еВ, крім молекулярних смуг знайдено і лінії атома селену при довжинах хвиль 207.5, 216.4 і 473.1 нм, інтенсивність яких зростає із збільшенням енергії електронів. Зазначимо, що нами була виявлена ще одна інтенсивна лінія атома селену при 537 нм у спектрах, виміряних при енергіях електронів 30 і 50 еВ. Ці спектральні лінії нами ідентифіковано, і вони відповідають наступним переходам атома селену: $\lambda = 207.5$ нм ($4p^{43}P_2 - 4p^35s^5S_2^0$), $\lambda = 216.4$ нм ($4p^{43}P_1 - 4p^35s^5S_2^0$), $\lambda = 473.1$ нм ($4p^35s^5S_2^0 - 4p^36p^5P_3$) і $\lambda = 537$ нм ($4p^35s^5S_2^0 - 4p^36p^5P_2$).

У спектрі, виміряному при енергії 50 еВ, у великій кількості проявляються додаткові спектральні лінії. Аналіз цих ліній показав, що дев'ять з них, як і у випадку сірки, відповідають збудженню енергетичних рівнів атомарного іона селену.

На рис. 3 наведено оптичні функції збудження (ОФЗ) чотирьох спектральних ліній атома селену. Перші дві лінії відповідають резонансному переходу атома селену.

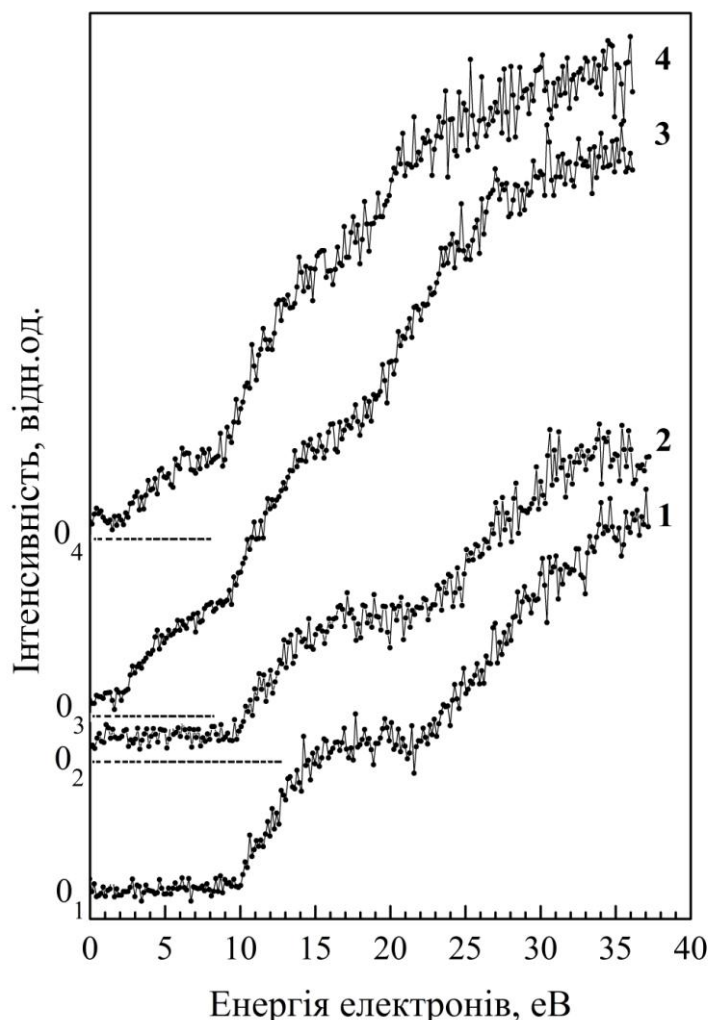
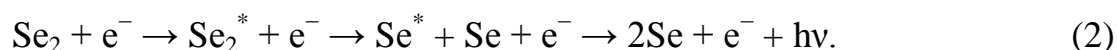
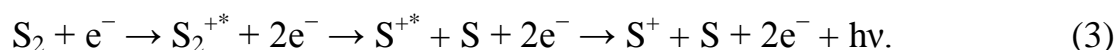


Рис. 3. Оптичні функції збудження спектральних ліній атома селену:
1 – $\lambda = 207.5$ нм; 2 – $\lambda = 216.4$ нм; 3 – $\lambda = 473.1$ нм; 4 – $\lambda = 537$ нм.

Особливістю цих двох ліній є те, що в цій області спектра відсутнє випромінювання молекулярних смуг, отже відсутній фон на функціях збудження. Дві інші лінії уже виділяються на фоні значної інтенсивності. Як і слід було очікувати, ОФЗ спектральних ліній при 207.5 і 216.4 нм, що випромінюють зі спільного верхнього рівня, практично збігаються. Як бачимо, на функціях збудження цих ліній спостерігається чіткий поріг збудження при енергії 9.6 ± 0.3 еВ, стрімке зростання інтенсивності функції збудження з максимумом при енергії ~ 17 еВ і подальшим ростом, починаючи з енергії ~ 22 еВ до енергії ~ 35 еВ. Відхилення істинного порогу збудження цих ліній (5.97 еВ) від виміряного нами свідчить про дисоціативне збудження енергетичних рівнів атома селену, що здійснюється за реакцією, аналогічною реакції:



Поріг такої реакції визначається енергією вихідного рівня спектральної лінії (5.97 еВ) і енергією дисоціації молекули Se_2 (3.41 еВ), тобто його величина становить 9.38 еВ. Енергія виміряних порогів спектральних ліній 207.5 і 216.4 нм становить 9.6 еВ, що підтверджує велику ймовірність реакції (2). У той же час подальше зростання інтенсивності ОФЗ цих ліній починаючи від енергії ~ 23 еВ пояснюється збудженням атомарного іона селену за реакцією:



ОФЗ спектральних ліній на довжині хвиль 473.1 і 537 нм також мають подібну поведінку. Від порогу збудження при енергії 3.6 ± 0.3 еВ до енергії ~ 12 еВ вони, очевидно, відтворюють функцію збудження молекулярних емісій. При більших енергіях має місце різке зростання інтенсивності, зумовлене збудженням вихідних рівнів цих ліній згідно з реакцією (2). Починаючи з енергії 23 еВ відбувається повторення поведінки ОФЗ спектральних ліній 207.5 і 216.4 нм. У випадку цих ліній також спостерігається зміщення істинного порогу від виміряного на енергію дисоціації молекули Se_2 .

Стосовно спектральних ліній атома сірки також виявлено, що вони утворюються в результаті дисоціативного збудження молекули S_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.

На рис. 4 наведено повний ефективний переріз утворення позитивних іонів у парах сірки у діапазоні енергій електронів від 8 до 16 еВ при температурі випаровування сірки 330 К. Як бачимо з рис. 4, після порогу енергетична залежність зростає повільно до енергії 12 еВ, а потім зростання стає більш різким. Аналіз показав, що на виміряній кривій проявляються особливості у вигляді зломів.

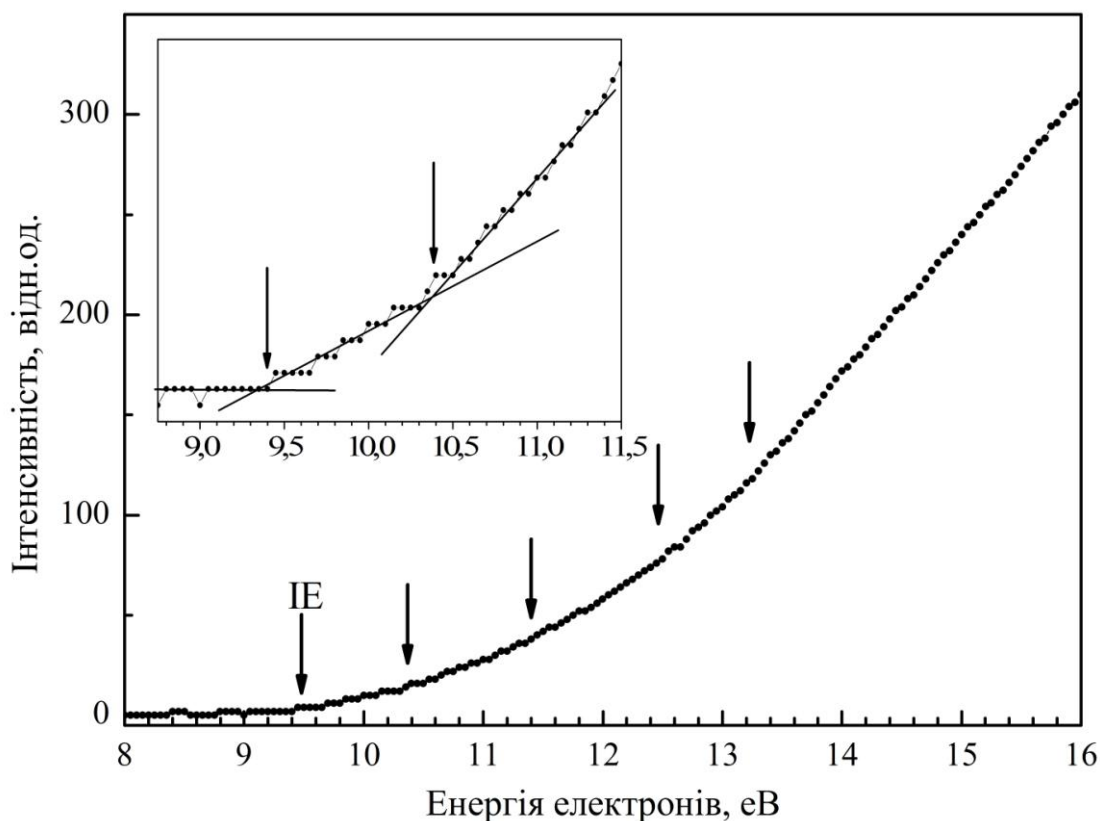


Рис. 4. Енергетична залежність повного ефективного перерізу утворення позитивних іонів у парах сірки. Вставка – лінійна апроксимація кривої у біляпороговій області енергій електронів.

Такі особливості показують зміну відносної інтенсивності виміряного сигналу (зменшення або збільшення) в результаті включення таких процесів як дисоціативна іонізація, фрагментація та збудження енергетичних рівнів іонів. Методом лінійної апроксимації окремої ділянки вимірної кривої визначено поріг іонізації сірки (9.5 ± 0.1 eV), що збігається з енергією появи S_2^+ [5*]. У біляпороговій області з'являється ще одна особливість при енергії 10.4 ± 0.1 eV, яка відповідає енергії появи S^+ . Величини цих енергій добре узгоджуються з результатами, які були отримані в наших мас-спектрометричних дослідженнях – 10.3 eV для S^+ і 9.6 eV для S_2^+ . Було виявлено ще три особливості при енергіях 11.4 ± 0.1 , 12.5 ± 0.1 і 13.2 ± 0.1 eV. Встановлено, що ці особливості (позначені стрілками на рис. 4) проявляються в результаті включення нових каналів дисоціативної іонізації молекул сірки з великим числом атомів S_n .

Енергетична залежність повного ефективного перерізу утворення негативних іонів у парах сірки була виміряна в діапазоні енергій електронів від 0 до 10 eV при температурі випаровування сірки 330 K. На енергетичній залежності проявляються три чіткі максимуми при енергіях 0.1 ± 0.1 , 3.5 ± 0.3 і 7.1 ± 0.3 eV. Перший вузький максимум в області енергії біля нуля має майже на два порядки більшу інтенсивність, ніж другий і третій. Крім цього, енергетична ширина першого максимуму, що становить 0.15 eV, практично збігається з розкидом електронів за енергією в пучку. Це є доказом резонансної природи походження цього максимуму,

тобто він утворюється внаслідок резонансного захоплення електронів низької енергії атомами та молекулами сірки S_n ($n = 1-8$), серед яких молекула S_8 має найбільшу концентрацію при даній температурі. Наступні два максимуми мають меншу інтенсивність, що свідчить про зменшення кількості утворених іонів. На основі результатів роботи [6*] можна стверджувати, що у повний ефективний переріз утворення негативних іонів у парах сірки переважно дають внески іони S_2^- , S_3^- , S_4^- і S_5^- .

Енергетична залежність повного ефективного перерізу утворення позитивних іонів у парах селену була виміряна в діапазоні енергій електронів від 7.5 до 16 еВ при температурі випаровування 400 К. На відміну від сірки, енергетична залежність у випадку селену після порогу зростає стрімко до енергії 12 еВ, а потім спостерігається зменшення відносної інтенсивності виміряного сигналу. Визначене значення порогу виявилось рівним 8.1 ± 0.1 еВ. Це добре узгоджується з енергією появи Se_8^+ . Завдяки високій моноенергетичності електронного пучка і малому кроку сканування енергії іонізуючих електронів нам удалося знайти у біляпорогової області ще чотири особливості у вигляді зломів при енергіях 8.5 ± 0.1 , 8.9 ± 0.1 , 9.3 ± 0.1 і 9.8 ± 0.1 еВ. Енергії цих особливостей ідентифіковано як енергії появи іонів Se_6^+ , Se_2^+ , Se_4^+/Se_3^+ та Se^+ , відповідно. Вище біляпорогової області енергії електронів було знайдено п'ять особливостей при енергіях 10.5, 10.9, 12.2, 13.0 і 14.1 ± 0.1 еВ. При 10.5 і 10.9 еВ спостерігається зростання нахилу кривої, що свідчить про включення нових процесів іонізації, в результаті яких збільшується кількість утворених іонів. Найбільш ймовірно – відбувається дисоціативна іонізація молекул селену Se_n ($n = 3-8$) з утворенням іонів Se^+ і Se_2^+ . Стосовно решти особливостей спостерігається спад нахилу кривої, тобто зменшується кількість утворених іонів. Припускаємо, що це є результатом фрагментації іонів Se_2^+ , Se_4^+/Se_3^+ і Se_6^+ , які дають найбільший внесок у повний переріз утворення іонів.

Енергетичну залежність повного ефективного перерізу утворення негативних іонів у парах селену виміряно в діапазоні енергій електронів від 0 до 8 еВ при температурі випаровування селену 400 К. На вимірній кривій виявлено чотири особливості у формі максимума при енергіях 0 ± 0.1 , 2.1 ± 0.3 , 3.5 ± 0.3 і 4.3 ± 0.3 еВ. Перший максимум, як і у випадку сірки, є вузьким і має найбільшу інтенсивність. На відміну від сірки, наступні максимуми мають такий же порядок інтенсивності, що і перший максимум. Це свідчить про велику ймовірність утворення негативних іонів при більш високих енергіях. Нами зроблено припущення, що в дослідженій області енергії головним чином утворюються молекулярні іони селену Se_n^- ($n = 1-5$).

ВИСНОВКИ

Ця дисертаційна робота присвячена експериментальному дослідженню складу сірки і селену у газовій фазі, утворенню позитивних та негативних іонів у їх парах, а також їх збудженню. До основних результатів та висновків роботи можна віднести такі:

1. Вперше проведено комплексні дослідження елементарних процесів зіткнень електронів з сіркою і селеном у газовій фазі методами мас-спектрометрії, фотонної та електронної спектроскопії.

2. Ретельний аналіз вимірних мас-спектрів сірки і селену при температурах 380 і 470 К, відповідно, дав можливість встановити, що в процесі випаровування утворюються як атоми, так і молекули речовин, що досліджувалися. Отримані нами температурні залежності вказують на складний характер утворення атомарних та молекулярних іонів сірки і селену, співвідношення яких в мас-спектрах суттєво змінюється від температури. Встановлено, що процеси фрагментації і дисоціативної іонізації мають велике значення при взаємодії електронів з молекулами сірки і селену.

3. На основі вимірних енергетичних залежностей ефективних перерізів утворення позитивних атомарних та молекулярних іонів сірки і селену з використанням спеціальної методики визначені 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.

4. 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 ± 0.2 еВ.

5. Вперше досліджено спектри 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 $\text{B}^3\Sigma^-$ стану молекули S_2 , а при енергії 50 еВ має місце збудження енергетичних рівнів S та S^+ . У спектрах знайдено та ідентифіковано 2 спектральні лінії S та 26 спектральних ліній S^+ .

6. Вперше досліджено спектри оптичного випромінювання парів селену в діапазоні 200-590 нм при їх збудженні моноенергетичними електронами фіксованих енергій 20, 30 і 50 еВ. Показано, що при енергії електронів 20 еВ в основному збуджуються електронно-коливні рівні $\text{B}^3\Sigma^-$ 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^+ .

7. 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 .

8. Вперше виміряно повний ефективний переріз утворення позитивних іонів у парах сірки і селену при взаємодії з електронами в діапазоні енергій від порогу до 16 еВ. Визначено пороги іонізації сірки (9.5 ± 0.1 еВ) та селену (8.2 ± 0.1 еВ), які відповідають енергіям появи S_2^+ і Se_8^+ , відповідно.

9. Вперше виміряно повний ефективний переріз утворення негативних іонів у парах сірки і селену при взаємодії з електронами в діапазоні енергій 0-10 еВ. Виявлено, що в дослідженій області енергій має місце резонансне захоплення електронів компонентами парів сірки і селену. Показано, що процес захоплення електронів відбувається найефективніше при енергіях електронів, близьких до нульових, де повний ефективний переріз утворення негативних іонів сягає максимального значення.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ РОБІТ

- 1*. Berkovitz J. Equilibrium Composition of Sulfur Vapor / J. Berkovitz, J.R. Marquart // J. Chem. Phys. – 1963. – V. 39. – P. 275–283.
- 2*. Berkowitz J. Equilibrium Composition of Selenium Vapor; the Thermodynamics of the Vaporization of HgSe, CdSe, and SrSe / J. Berkowitz, W.A. Chupka // J. Chem. Phys. – 1966 – V. 45. – P. 4289–4294.
- 3*. Peterson D.A. Sulfur discharges and spectra / D.A. Peterson, L.A. Shlie. // J. Chem. Phys. – 1980. – V. 73. – P. 1551–1566.
- 4*. Berkowitz J. Photoionization of High Temperature Vapors. VI. S_2 , Se_2 , and Te_2 / J. Berkowitz, W.A. Chupka // J. Chem. Phys. – 1969. – V. 50. – P. 4245–4250.
- 5*. Rosinger W. Electron Impact Induced Excitation Processes Involving the Sulfur Clusters S_2 to S_8 / W. Rosinger, M. Grade, W. Hirschwald // Phys. Chem. – 1983.– V. 87. – P. 536–542.
- 6*. Le Coat Y. Negative ion formation by electron attachment in S_2 and in the sulphur vapour / Y. Le Coat, L. Bouby, J.P. Guillotin, J.P. Ziesel // J. Phys. B. – 1996. – V. 29. – P. 545–553.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Маркуш П.П. Іонізація парів селену повільними електронами / П.П. Маркуш // Науковий вісник УжНУ – 2013. – № 34. – С. 149–153.
2. Маркуш П.П. Спектри постійних залишкових енергій електронів при їх взаємодії з сіркою у газовій фазі / П.П. Маркуш // Науковий вісник УжНУ – 2012. – № 32. – С. 24–29.
3. Завилопуло А.Н. Ионизация и диссоциативная ионизация серы в газовой фазе электронным ударом / А.Н. Завилопуло, П.П. Маркуш, О.Б. Шпеник, М.И. Микита // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, Вып. 7. – С. 8–14.

4. Erdevdy M. Excitation of the gas-phase selenium by electron impact / M. Erdevdy, P. Markush, O. Shpenik, V. Zvenihorodsky // *Eur. Phys. J. D* – 2015. – V. 69, 17. – P. 1–3.
5. Эрдевди Н.М. Возбуждение паров серы электронным ударом / Н.М. Эрдевди, О.Б. Шпеник, П.П. Маркуш // *ЖПС*. – 2015. – Т. 82, № 1. – С. 22–28.
6. Эрдевди Н.М. Возбуждение паров селена электронным ударом / Н.М. Эрдевди, О.Б. Шпеник, П.П. Маркуш // *Опт. и спектр.* – 2015. – Т. 119, № 5. – С. 776–782.
7. Шпеник О.Б. Електронне збудження та іонізація парів сірки, селену, телуру / О.Б. Шпеник, М.М. Ердевді, П.П. Маркуш, Є.Е. Контрош, І.В. Чернишова // *Укр. фіз. журн.* – 2015. – Т. 60, № 3. – С. 217–224.
8. Маркуш П.П. Утворення позитивних і негативних іонів при взаємодії парів сірки з моноенергетичними електронами / П.П. Маркуш, І.В. Чернишова, Є.Е. Контрош, О.Б. Шпеник // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції “Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії” (до 90-річчя від дня народження проф. І.П. Записочного і 20-річчя створення ІЕФ). – Ужгород. – 2012. – С. 56.
9. Маркуш П.П. Спектри постійних залишкових енергій електронів при їх взаємодії з сіркою у газовій фазі / П.П. Маркуш, І.В. Чернишова, Є.Е. Контрош, О.Б. Шпеник // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародної конференції “Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії” (до 90-річчя від дня народження проф. І.П. Записочного і 20-річчя створення ІЕФ). – Ужгород. – 2012. – С. 68.
10. Маркуш П.П. Іонізація селену повільними електронами у газовій фазі / П.П. Маркуш // В зб.: Програма і тези доповідей Конференції молодих учених та аспірантів “ІЕФ-2013”. – Ужгород. – 2013. – С. 59.
11. Markush P.P. Positive and negative ion formation in the selenium vapor by electron impact / P.P. Markush, I.V. Chernyshova, J.E. Kontros, O.B. Shpenik // *Abstract of contributed papers.* – XXVII Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions. – Lanzhou, China. – 2013. – P. 18564.
12. Erdevdy M. Excitation of selenium in gas-phase by electron impact / M. Erdevdy, O. Shpenik, P. Markush, V. Zvenihorodsky // *Abstracts of Contributed Papers.* – 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. – Bratislava, Slovakia. – 2014. – P. 77–78.
13. Erdevdy M. Excitation of sulphur by slow electrons / M. Erdevdy, O. Shpenik, P. Markush, V. Zvenihorodsky // *Abstracts of Contributed Papers.* – 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. – Bratislava, Slovakia. – 2014. – P. 79–80.
14. Zvilopulo A. Study of selenium molecular beam by electron impact / A. Zvilopulo, O. Shpenik, P. Markush, O. Pylypchynets // *Abstracts of Contributed Papers.* – 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons. – Frankfurt, Germany. – 2016. – P. 327.
15. Маркуш П.П. Мас-спектроскопічне вивчення сірки і селену у газовій фазі електронним ударом / П.П. Маркуш, О.Б. Шпеник, А.М. Завилопуло // В зб.: Програма і тези доповідей Конференції молодих учених і аспірантів “ІЕФ-2017”. – Ужгород. – 2017. – С. 105–106.

АНОТАЦІЯ

Маркуш П.П. Збудження та іонізація при взаємодії електронів з сіркою і селеном у газовій фазі – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. – ДВНЗ “Ужгородський національний університет” Міністерства освіти і науки України, Ужгород, 2017.

З використанням методів мас-спектрометрії, фотонної та електронної спектроскопії вперше проведені комплексні дослідження елементарних процесів зіткнень електронів з сіркою і селеном у газовій фазі. Встановлено, що в процесі випаровування сірки і селену утворюються як атоми, так і молекули. Виміряно енергетичні залежності ефективного перерізу утворення позитивних іонів атомів та молекул сірки і селену та визначено енергії їх появи. Встановлено, що енергетичні залежності ефективного перерізу утворення іонів мають немонотонну поведінку, яка зумовлена включенням нових каналів реакції з ростом енергії іонізуючих електронів. Показано, що при енергіях електронів нижче 20 еВ збуджуються електронно-коливні рівні $V^3\Sigma^-$ стану молекул S_2 і Se_2 , а при енергії 50 еВ збуджуються S і S^+ та Se і Se^+ . Встановлено, що атоми досліджуваних речовин утворюються в збудженому стані в процесі дисоціації молекул S_2 і Se_2 . Вперше виміряно повні ефективні перерізи утворення позитивних іонів у парах сірки і селену електронним ударом в діапазоні енергій від порогу до 16 еВ. Визначено пороги іонізації сірки (9.5 еВ) та селену (8.2 еВ). Виявлено, що в області енергії 0-10 еВ має місце резонансне захоплення електронів компонентами парів сірки і селену. Показано, що процес захоплення електронів відбувається найефективніше при енергіях електронів, близьких до нульових, де повний ефективний переріз утворення негативних іонів сягає максимального значення.

Ключові слова: електрон, атом, молекула, позитивний іон, негативний іон, іонізація, збудження, резонанс.

АННОТАЦИЯ

Маркуш П.П. Возбуждение и ионизация при взаимодействии электронов с серой и селеном в газовой фазе – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника. – ГВУЗ “Ужгородский национальный университет” Министерства образования и науки Украины, Ужгород, 2017.

С использованием методов масс-спектрометрии, фотонной и электронной спектроскопии впервые проведены комплексные исследования элементарных

процессов столкновений электронов с серой и селеном в газовой фазе. Установлено, что в процессе испарения серы и селена образуются как атомы, так и молекулы. Измерены энергетические зависимости эффективного сечения образования положительных ионов атомов и молекул серы и селена и определены энергии их появления. Установлено, что энергетические зависимости эффективных сечений образования ионов имеют немонотонное поведение, обусловленное включением новых каналов реакции с ростом энергии ионизирующих электронов. Показано, что при энергиях электронов менее 20 эВ возбуждаются электронно-колебательные уровни $B^3\Sigma_u^-$ состояния молекул S_2 и Se_2 , а при энергии 50 эВ возбуждаются S и S^+ и Se и Se^+ . Установлено, что атомы исследуемых веществ образуются в возбужденном состоянии в процессе диссоциации молекул S_2 и Se_2 . Впервые измерены полные эффективные сечения образования положительных ионов в парах серы и селена электронным ударом в диапазоне энергии от порога до 16 эВ. Определены пороги ионизации серы (9.5 эВ) и селена (8.2 эВ). Обнаружено, что в области энергии 0-10 эВ имеет место резонансный захват электронов компонентами паров серы и селена. Показано, что процесс захвата электронов происходит наиболее эффективно при энергиях электронов, близких к нулевым, где полное эффективное сечение образования отрицательных ионов достигает максимального значения.

Ключевые слова: электрон, атом, молекула, положительный ион, отрицательный ион, ионизация, возбуждение, резонанс.

SUMMARY

Markus P.P. Excitation and ionization by interaction of electrons with gas-phase sulfur and selenium – Manuscript.

This thesis is submitted to acquire the scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences, speciality 01.04.04 – Physical Electronics. – State Higher Educational Establishment “Uzhhorod National University”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Uzhhorod, 2017.

Elementary processes occurring during interaction of electrons with gas-phase sulfur and selenium have been studied for the first time using methods of mass spectrometry, photon spectroscopy and electron spectroscopy. It has been found that atoms and molecules are equally formed in the process of sulfur and selenium evaporation. The energy dependences of ion formation effective cross section of sulfur and selenium atoms and molecules were measured as well as the energy appearances of the ions were determined. It has been found that the energy dependences of ion formation effective cross section have non-monotonic behavior due to the involvement of new reaction channels with increasing electron energy. It has been shown that the excitation of electron-vibrating levels of the $B^3\Sigma_u^-$ state of S_2 and Se_2 molecules occur in the energy region below 20 eV, while at 50 eV the S and S^+ as well as Se and Se^+ become excited. It has been found for the first time that the atoms of substances under investigation are formed in the excited

state through dissociation of the S_2 and Se_2 molecules. The total effective cross sections of positive ion formation in sulfur and selenium vapors were measured for the first time by electron impact in the energy region from the threshold to 16 eV. The ionization threshold for the sulfur (9.5 eV) and selenium (8.2 eV) were determined. It has been found that the resonance electron capture by the components of sulfur and selenium vapor takes place in the energy region of 0-10 eV. It has been shown that the process of electron capture occurring the most effectively at near zero energy, where the total effective cross section of negative ion formation achieves its maximum value.

Keywords: electron, atom, molecule, positive ion, negative ion, ionization, excitation, resonance.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman
Тираж 100 шт. Замовлення № 48

Видавництво «ФОП Сабов А.М.».
м. Ужгород, вул. Університетська, 21/220. Тел./факс: (0312) 64-37-22
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4815 від 25.02.2015р.
Друк: ФОП Сабов А.М., тел.: 050-43-22-437