

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

Роман Вікторія Іванівна



УДК 539.184;539.186

**АВТОІОНІЗАЦІЙНІ ТА РЕЗОНАНСНІ ЯВИЩА
ПРИ ЕЛЕКТРОННОМУ ЗБУДЖЕННІ АТОМА РУБІДЮ**

спеціальність 01.04.04 – фізична електроніка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Ужгород – 2015

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник:

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Боровик Олександр Олександрович,
Інститут електронної фізики НАН України,
старший науковий співробітник відділу
електронних процесів

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Лазур Володимир Юрійович,
ДВНЗ «Ужгородський національний університет» МОН
України, завідувач кафедри теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор
Черняк Валерій Якович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка МОН України, професор кафедри фізичної
електроніки

Захист відбудеться «27» січня 2016 р. о 10 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 «25» грудня 2015 р.

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



Міца В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стани атома, які утворюються у результаті збудження двох і більше електронів валентної оболонки або одного електрона субвалентної оболонки, енергетично розташовані вище першого потенціалу іонізації. Залежно від електронної конфігурації такого “надзбудженого” стану, значень його повного моменту та мультиплетності, атомна система має два канали дезбудження (розпаду): електронний – з утворенням іона і вільного (ежектвованого) електрона та радіаційний – з випромінюванням фотона:



Процес електронного розпаду (2) одержав назву *автоіонізації*, а відповідні енергетичні стани – *автоіонізаційних* станів. Процеси утворення та розпаду автоіонізаційних станів (1)-(3) супроводжуються низкою інших атомних процесів. У припороговій області енергій електронів (1-2 еВ вище порогу збудження стану) такими процесами є утворення станів негативних іонів (резонансів) та ефект взаємодії після зіткнення. При більш високих значеннях енергій починає проявлятися каскадне заселення рівнів. Важливість розуміння цих процесів для поглиблення уявлень про внутрішньоатомні процеси зумовлює **фундаментальне значення** таких досліджень.

Автоіонізація за своєю суттю є непрямим процесом іонізації і тому може впливати на перебіг, енергетичний баланс та зарядовий розподіл компонент різних типів плазмових середовищ. Для кількісного опису параметрів цих середовищ необхідні дані з перерізів збудження та каналів розпаду автоіонізаційних станів, що визначає важливе **прикладне значення** досліджень автоіонізації.

Атоми лужних елементів мають найпростішу структуру зовнішніх електронних оболонок, яка складається з одного валентного електрона та шести електронів субвалентної оболонки. Відносно низькі температури випаровування, висока адгезія (до 100%) парів практично до всіх металічних поверхонь, низьке значення енергії зв'язку зовнішніх електронних оболонок і, відповідно, високі ефективні перерізи електронного збудження та іонізації роблять їх достатньо “зручними” об'єктами для експериментальних досліджень. Проста будова зовнішніх електронних оболонок робить атоми лужних металів привабливими об'єктами також і для теоретичного моделювання процесів збудження та іонізації. На початок даної роботи для атомів лужних металів були проведені комплексні експериментально-теоретичні дослідження електронного збудження субвалентних оболонок в атомі літію, натрію, калію та цезію [1*]. Атом рубідію залишався єдиним лужним металом, для якого як експериментальні, так і

теоретичні дані з дослідження автоіонізації були нечисленними і мали оглядовий характер. Зокрема, на початок даних досліджень для атома рубідію були відсутні систематичні дані зі спектроскопічної ідентифікації автоіонізаційних станів, абсолютних перерізів їх збудження, а також перерізу автоіонізації. Повністю були відсутні дослідження припорогової області енергій зіткнень, де найбільш ефективно проявляються процеси резонансного збудження та ефект взаємодії після зіткнення. Викладені обставини зумовлюють **актуальність** теми дослідження і обґрунтування її вибору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася у відділі електронних процесів Інституту електронної фізики НАН України. Дані дослідження були пов'язані з основними науковими напрямками діяльності інституту і виконувалися у рамках трьох науково-дослідницьких тем, затверджених розпорядженням Бюро відділення фізики і астрономії НАН України:

1. “Експериментальне та теоретичне дослідження складних атомів та молекул при збудженні електронним ударом” – 2009-2010 рр., № Держреєстрації 0109U005602;
2. “Процеси взаємодії моноенергетичних електронів з багатоелектронними атомними системами” – 2009-2013 рр., № Держреєстрації 0109U001499;
3. “Фізичні процеси та явища при взаємодії електронів і фотонів з речовиною в газовому та конденсованому станах” – 2012-2016 рр., № Держреєстрації 0112U002079.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягала в отриманні даних про процеси, що мають місце при збудженні $4p^6$ оболонки атома рубідію електронами з енергією 15-600 еВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **техніко-конструкторські та наукові завдання**:

1. Здійснити модернізацію вакуумної системи експериментальної установки для поліпшення стабільності параметрів вимірів. Розробити та впровадити методику роботи з хімічно активним металом рубідієм. Розробити конструкцію та виготовити вихідну електронно-оптичну систему монохроматора первинного електронного пучка для роботи у широкому діапазоні енергій 15-600 еВ.

2. Провести виміри енергетичних спектрів розсіяних та ежектованих електронів при збудженні $4p^6$ оболонки атома рубідію та дослідити динаміку збудження спектрів ежектованих електронів в енергетичному діапазоні енергій зіткнень 15-600 еВ. Здійснити спектроскопічну ідентифікацію спостережуваних ліній у спектрах розсіяних та ежектованих електронів.

3. Одержати енергетичні залежності ефективних перерізів електронного збудження АІС у діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 еВ та

проаналізувати вплив станів негативних іонів і каскадних процесів на ефективність збудження автоіонізаційних станів.

4. Дослідити ефект взаємодії після зіткнення у спектрах ежектованих електронів атома рубідію.

5. Одержати енергетичну залежність перерізу автоіонізації атома рубідію, визначити його абсолютне значення та відносний внесок у повний переріз однократної іонізації електронним ударом.

6. Провести розрахунки парціальних перерізів іонізації та автоіонізації атома рубідію, а також здійснити аналіз дієвості найбільш поширених теоретичних наближень для опису цих процесів.

Об'єкт дослідження: процеси утворення і розпаду автоіонізаційних станів атома рубідію, а також явища резонансного збудження і взаємодії після зіткнення, що супроводжують ці процеси.

Предмет дослідження: ефективні перерізи, канали утворення і розпаду автоіонізаційних станів та станів негативних іонів, а також спектроскопічна ідентифікація цих станів при електронному збудженні $4p^6$ оболонки в атомі рубідію.

Методи дослідження. Енергетичні спектри розсіяних та ежектованих електронів атома рубідію були одержані з використанням методу електронної спектроскопії у поєднанні з технікою електронного та атомного пучків, що перетинаються.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті виконання даної роботи *вперше*:

1. Досліджено динаміку збудження спектрів ежектованих електронів у діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження $4p^6$ оболонки до 600 eV, що дозволило провести повну спектроскопічну ідентифікацію ліній, спостережуваних в енергетичних спектрах електронів атома рубідію.

2. Визначено абсолютні значення ефективних перерізів електронного збудження автоіонізаційних станів, які становлять $\sim 10^{-17}$ см², та встановлено домінуючу роль станів негативного іона Rb^- при електронному припороговому збудженні автоіонізаційних станів. Визначено енергії, перерізи збудження, канали розпаду станів негативних іонів Rb^- та здійснено їх спектроскопічну ідентифікацію.

3. Виявлено та досліджено електронне збудження молекули Rb_2 та одержано абсолютний переріз збудження молекулярного автоіонізаційного стану. Показано, що величина цього перерізу становить у максимумі $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{-14}$ см², що є на три порядки більшою за величину перерізів збудження атомних автоіонізаційних станів.

4. Виявлено ефект взаємодії після зіткнення в енергетичних спектрах ежектованих електронів атома рубідію та встановлено прямий зв'язок цього ефекту з резонансним збудженням автоіонізаційних станів.

5. Визначено абсолютне значення перерізу автоіонізації атома рубідію у діапазоні енергій зіткнення від порогу збудження $4p^6$ оболонки до 600 eV, яке у максимумі складає $(2.9 \pm 0.6) \times 10^{-16}$ см², та встановлено, що найбільший внесок у переріз автоіонізації атома рубідію дають автоіонізаційні стани $5s5p$, $4d5s$ конфігурацій. Показано, що відносний внесок перерізу автоіонізації у повний переріз однократної іонізації атома рубідію електронним ударом становить $32 \pm 5\%$.

6. На базі проведених теоретичних розрахунків парціальних перерізів іонізації $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ оболонок та перерізів збудження $4p^6$, $4s^2$ оболонок визначено роль кожної з них у формуванні повного перерізу однократної іонізації атома рубідію.

Достовірність одержаних результатів була забезпечена сучасним рівнем техніки експерименту, правильним вибором розробленої методики досліджень, контрольними вимірюваннями, ретельністю та багатократністю вимірів, відтворюваністю результатів і їх підтвердженням теоретичними розрахунками.

Наукове значення одержаних результатів. Одержані у даній роботі результати дозволяють глибше зрозуміти природу електрон-атомних взаємодій, енергетичну структуру автоіонізаційних атомних рівнів, а також переходів між ними; виявляють домінуючу роль станів негативних іонів у припороговому збудженні автоіонізаційних станів, дозволяють зрозуміти закономірності утворення та розпаду цих станів. Одержані експериментальні результати стимулювали розробку нових теоретичних наближень для опису процесу електронного збудження $4p^6$ оболонки у припороговій області енергій зіткнень. Також вони дозволили перевірити дієвість існуючих теоретичних наближень для розрахунку параметрів збудження та каналів розпаду автоіонізаційних станів, перерізів іонізації та автоіонізації атома рубідію.

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

- при аналізі емісійних спектрів плазмових джерел випромінювання;
- для пошуку активних середовищ та розробки лазерів на парах металу в ультрафіолетовій області спектра;
- при одержанні пучків негативних іонів металів для інжекційного нагріву плазми;
- для розробки нових теоретичних моделей взаємодії електронів зі складними атомними системами.

Особистий внесок здобувача у виконання досліджень, які склали основу дисертаційної роботи, полягає у наступному:

- здійснено модернізацію вакуумної системи установки, що дозволило суттєво стабілізувати експериментальні умови вимірів і тим самим підвищити надійність одержуваних даних;
- розраховано та виготовлено вихідну електронно-оптичну систему монохроматора електронного пучка для роботи в широкому діапазоні енергій зіткнень;
- автору належить провідна роль у підготовці та проведенні експериментальних досліджень, обробці експериментальних даних, аналізі та інтерпретації отриманих результатів;
- автором самостійно проведено теоретичні розрахунки перерізів електронного збудження та іонізації атома рубідію;
- здобувачу належить провідна роль у представленні результатів на конференціях та підготовці публікацій.

Спільно проведено: експериментальне дослідження спектрів ежектованих електронів атома рубідію з д.ф.-м.н. О. О. Боровиком (Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород), енергетичних спектрів розсіяних електронів – з аспірантом В. В. Грицько та д.ф.-м.н. О. О. Боровиком (Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород); дослідження ефекту взаємодії після зіткнення – з д.ф.-м.н. О. О. Боровиком та д.ф.-м.н. Г. М. Огурцовим (Фізико-технічний інститут ім. Йоффе, Санкт-Петербург, Росія); спектроскопічну ідентифікацію автоіонізаційних станів – з д.ф.-м.н. О. О. Боровиком та к.ф.-м.н. А. В. Купліаускіене (Вільнюський університет, Вільнюс, Литва); спектроскопічну ідентифікацію станів негативних іонів – з д.ф.-м.н. О. О. Боровиком та к.ф.-м.н. О. І. Зацаринним та проф. К. Бартчатом (Університет Дрейка, Дес-Мойнс, США).

Автором самостійно написані наукові роботи [1, 14, 24-26]; їй належить основний внесок у написанні робіт [6, 17, 21-23]; написано спільно з О. О. Боровиком та А. В. Купліаускіене роботи [2, 5, 7-9, 11-13, 15, 18-21, 23, 27]; з О. О. Боровиком, О. І. Зацаринним та К. Бартчатом – роботи [3, 7, 10, 16]; з О. О. Боровиком та Г. Н. Огурцовим – роботи [4, 16].

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, що представлені у даній роботі, доповідалися та обговорювалися на: міжнародних конференціях молодих вчених та аспірантів “ІЕФ-2011” (м. Ужгород, 2011 р.); “ІЕФ-2013” (м. Ужгород, 2013 р.); “ІЕФ-2015” (м. Ужгород, 2015 р.); міжнародних конференціях з фізики електронних, фотонних і атомних зіткнень “ІСРЕАС ХХVІІ” (м. Белфаст, Великобританія, 2011 р.); “ІСРЕАС ХХVІІІ” (м. Ланьчжоу, Китай, 2013 р.); “ІСРЕАС ХХІХ” (м. Толедо, Іспанія, 2015 р.); міжнародній конференції з атомної спектроскопії “EGAS 44” (м. Гетеборг, Швеція, 2012 р.); восьмій міжнародній конференції по атомних та

молекулярних даних "ICAMDATA-8" (м. Меріленд, США, 2012 р.); науковій конференції "Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії" (м. Ужгород, 2012 р.); науковій конференції професорсько-викладацького складу УжНУ (м. Ужгород, 2012 р.); міжнародній школі з фундаментальної атомної спектроскопії "ФАС ХХ" (м. Воронеж, Росія, 2013 р.); міжнародній науково-технічній конференції з фізики, електроніки та електротехніки "ФЕЕ-2014" (м. Суми, Україна, 2014 р.).

Публікації. Результати експериментальних досліджень, що представлені у даній роботі, опубліковані в 27 наукових працях, з них 9 статей у фахових журналах та 18 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 122 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 132 сторінки, з яких 116 складають основний текст дисертації. Робота містить 41 рисунок і 4 таблиці.

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** описані методичні аспекти дослідження явища автоіонізації та представлена загальна характеристика установки, до складу якої входили вакуумна камера з електронним спектрометром та системи вакуумного помпування, електроживлення і детектування сигналу. Електронний спектрометр складався з електростатичного 127° енергоаналізатора розсіяних і ежектованих електронів, джерел електронного та атомного пучків. Дослідження проведені при температурі джерела атомного пучка 120°C , моноенергетичності первинного електронного пучка 0.12 eV, енергетичній роздільній здатності аналізатора $\leq 0.05 \text{ eV}$, концентрації атомного пучка 10^{11} ат/см^3 і вакуумі у камері спектрометра $\leq 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. Максимальна сумарна невизначеність для основної частини одержаних даних з абсолютних перерізів збудження не перевищувала 25%.

Другий розділ присвячено аналізу результатів дослідження енергетичних спектрів розсіяних та ежектованих електронів атома рубідію в діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 eV. На рис. 1 наведено приклади спектрів ежектованих електронів для різних значень енергії зіткнень.

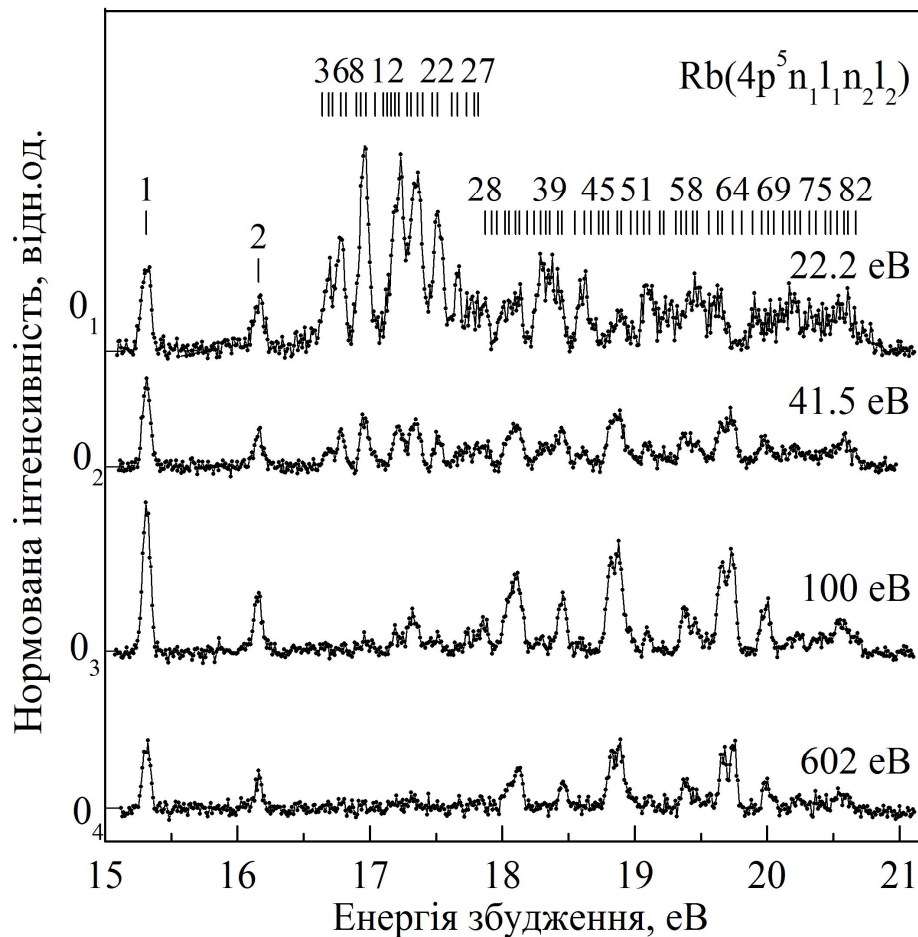


Рис. 1. Спектри ежектованих електронів атома рубідію при різних енергіях зіткнень.

Аналіз структури спектрів розсіяних та ежектованих електронів виявив наявність 82 ліній із порогами збудження від 15.31 до 20.67 eV. У спектрах також виявлено широку лінію, що відповідає збудженню автоіонізаційного стану молекули Rb_2 . Досліджено динаміку збудження ліній у спектрах ежектованих електронів у діапазоні енергій зіткнень 15-600 eV та визначено характер збудження відповідних автоіонізаційних станів. Виявлено наявність резонансних процесів збудження автоіонізаційних станів у припороговій області енергій зіткнень. Аналіз динаміки збудження спектрів показав, що всі вони відображають електронний розпад автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ атома рубідію.

Шляхом всебічного аналізу теоретичних розрахунків енергій, перерізів збудження та ймовірностей розпаду автоіонізаційних станів атома рубідію, проведених для нас в Інституті теоретичної фізики Вільнюського університету і всіх інших відомих експериментальних та теоретичних даних, запропоновано спектроскопічну ідентифікацію для 76 із 82 атомних та молекулярного автоіонізаційних станів [7], а також визначено схему енергетичного розташування і каналів розпаду цих станів (див. рис. 2).

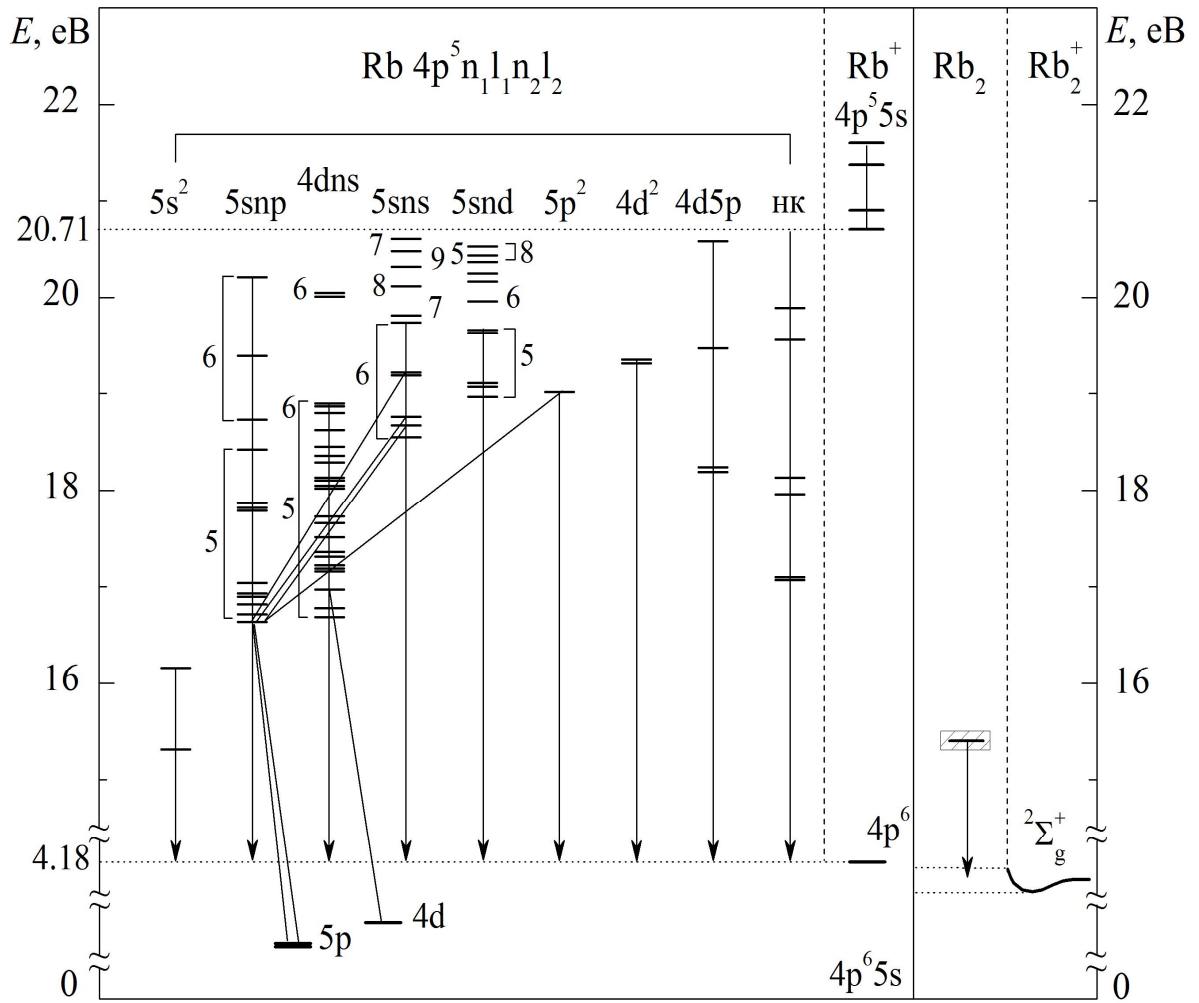


Рис. 2. Схема енергетичного розташування та каналів розпаду автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ атома та молекули рубідію. Лінії зі стрілками позначають електронний канал розпаду, лінії без стрілок – радіаційний канал розпаду.

Встановлено, що за кількістю та ефективністю збудження домінують автоіонізаційні стани конфігурацій $5s5p$ та $4d5s$, а за ефективністю розпаду домінуючим є електронний канал розпаду автоіонізаційних станів атома рубідію з утворенням однозарядних іонів в основному стані.

У **третьому розділі** наведені енергетичні залежності перерізів збудження (функції збудження) 15 автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ та квазіметастабільного $(4p^5 4d5s)^4 S_{3/2}$ стану атома рубідію, а також функція збудження автоіонізаційного стану молекули Rb_2 . Досліджені функції збудження автоіонізаційних станів є сукупністю значень нормованих на струм первинного електронного пучка інтенсивностей відповідних ліній, визначених у спектрах ежектованих електронів при енергіях зіткнень від порогу збудження станів до кількох сотень електрон-вольтів. Одержані таким чином функції є енергетичними залежностями повного ефективного перерізу збудження автоіонізаційних станів у відносних одиницях. Переріз

збудження в абсолютних одиницях (у см^2) визначався шляхом нормування експериментальних даних на теоретичні розрахунки, одержані методом R -матриці [3]. Дані про абсолютний переріз збудження для одного стану дозволяли визначити абсолютні перерізи збудження інших станів за співвідношенням інтенсивностей відповідних ліній. На рис. 3 наведено функції збудження для найнижчих дублетних станів атома рубідію.

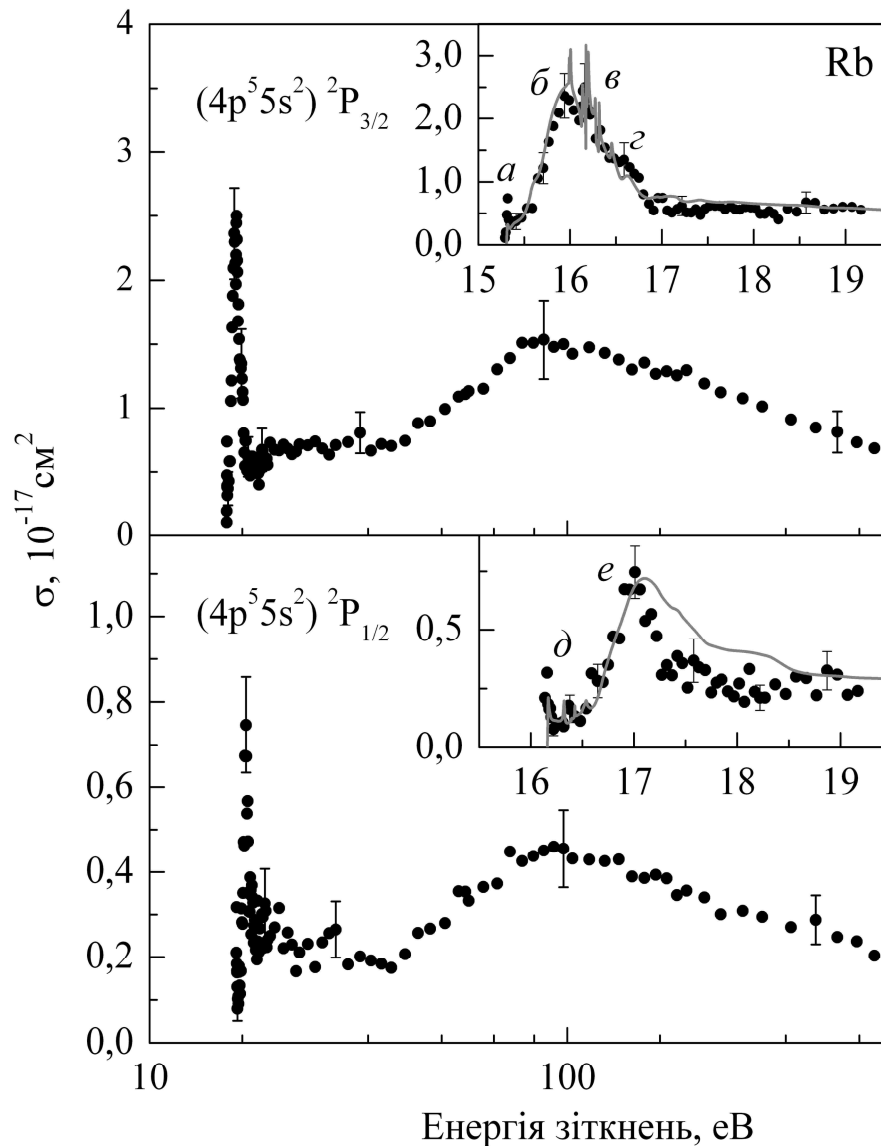


Рис. 3. Функції збудження дублетних $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$ та $(4p^5 5s^2)^2P_{1/2}$ автоіонізаційних станів атома рубідію. На вставках показано припорогові ділянки функцій збудження у порівнянні з результатами теоретичних розрахунків:

• – даний експеримент [3], — — розрахунок методом R -матриці [3].

Як бачимо з рис. 3, основні максимуми, що відповідають прямому збудженню станів $(4p^5 5s^2)^2P_{1/2,3/2}$, спостерігаються при енергії зіткнень ≈ 100 еВ, що повністю відповідає дублетному характеру збудження цих

рівнів. Із подальшим ростом енергії зіткнень ефективність збудження повільно знижується. У припороговій області енергій процес збудження всіх рівнів має виразний резонансний характер. Відповідні максимуми $(2.5 \pm 0.9) \times 10^{-17}$ і $(7 \pm 2) \times 10^{-18}$ см² розташовані при енергіях 16.2 еВ (²P_{3/2}) та 17.0 еВ (²P_{1/2}), які майже у півтора рази перевищують відповідні ефективні перерізи прямого збудження.

На рис. 3 (див. вставки) представлені функції збудження станів $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$ в області енергій зіткнень від порогу збудження до 20 еВ у порівнянні із теоретичними розрахунками, проведеними методом *R*-матриці з повним урахуванням релятивістського характеру процесу збудження. Як бачимо, обидві функції збудження мають вузькі максимуми у порозі та широкі максимуми при 0.8 еВ над порогом збудження і далі різкий спад інтенсивності перерізу збудження. При порівнянні експериментальних та теоретичних даних бачимо, що у межах експериментальної невизначеності теорія добре описує експериментальний переріз збудження у припороговій області енергій. З подальшим ростом енергії зіткнень також бачимо явну кореляцію результатів.

Експериментальний та теоретичний аналіз даних функцій збудження показав, що походження спостережуваних на всіх функціях збудження припорогових максимумів слід віднести, у першу чергу, до процесу резонансного утворення станів негативного іона Rb⁻. Крім того, наявність структурних особливостей *a-e* на функціях збудження дозволяє вважати, що максимуми є суперпозицією кількох щільно розташованих резонансів. Енергетичне розташування, спектроскопічна ідентифікація та канали розпаду станів негативного іона Rb⁻ (структура *a-e*), представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Енергії збудження, спектроскопічна ідентифікація та канали розпаду станів негативного іона Rb⁻

Резонанс	Енергія, еВ	Спектроскопічна ідентифікація	Канали розпаду
<i>a</i>	15.32	?	$(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$
<i>б</i>	15.94	$4p^5 5s(^3P)5p^2$	$(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$
<i>в, г</i>	16.16	$4p^5 5s(^3P)5p^2 + 4p^5 5s(^1P)5p^2$	$(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$
<i>д</i>	16.59	$4p^5 5s(^3P)5p^2$	$(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$
<i>e</i>	17.01	$4p^5 5s(^3P)4d(^2P)6s$	$(4p^5 5s^2)^2P_{1/2}$

У спектрах ежектованих електронів атома рубідію, наведених на рис. 1, поблизу лінії, що відповідає розпаду атомного автоіонізаційного стану $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2}$, при певних температурах джерела атомного пучка виявлено присутність широкої, малої за інтенсивністю лінії, яка, згідно з дослідженою

динамікою її збудження, відповідає електронному розпаду оптично забороненого автоіонізаційного стану молекули Rb_2 . Переріз збудження молекулярного автоіонізаційного стану C_x був приведений до абсолютної шкали шляхом нормування функції збудження стану C_x на теоретичне значення перерізу збудження автоіонізаційного стану $(4p^55s^2)^2P_{3/2}$ при енергії 16.04 еВ. При цьому було враховано як співвідношення інтенсивностей ліній, що відповідають розпаду атомного $(4p^55s^2)^2P_{3/2}$ і молекулярного C_x стану ($\approx 1:4$), так і співвідношення концентрацій атомів і молекул у пучку. Як показав аналіз функції збудження, на ній присутнє різке припорогове зростання перерізу збудження, що може бути результатом наявності резонансів негативних іонів Rb_2^- . Максимального значення переріз збудження молекулярного стану набуває при енергії зіткнень 16 еВ і становить $(1.07 \pm 0.32) \times 10^{-14}$ см², що є на три порядки більше за переріз збудження $(2.5 \pm 0.9) \times 10^{-17}$ атомного стану $(4p^55s^2)^2P_{3/2}$.

Четвертий розділ присвячено дослідженню припорогового явища – ефекту взаємодії після зіткнення (ВПЗ). Результати досліджень ефекту взаємодії після зіткнення у спектрах ежектованих електронів атома рубідію для дублетних $(4p^55s^2)^2P_{3/2,1/2}$ станів показали, що енергетична залежність ВПЗ-зсувів відповідних ліній у діапазоні надпорогових енергій від 0 до 5 еВ має простий, асимптотичний характер і описується класичною моделлю Баркера-Бері. Виявлено, що максимальних значень ВПЗ-зсув ліній набуває саме у порозі збудження $(4p^55s^2)^2P_{3/2,1/2}$ станів і складає 70 меВ і 130 меВ, відповідно. Апроксимація даних за формулою Баркера-Бері дозволила визначити автоіонізаційну ширину досліджених рівнів, а саме – для рівня $(4p^55s^2)^2P_{3/2}$ вона становить 4.4 ± 0.7 меВ, що близько до визначеного раніше експериментального значення 4.9 меВ [2*]. Для стану $(4p^55s^2)^2P_{1/2}$ автоіонізаційна ширина становить 7.0 ± 2.0 меВ.

Досліджено загальні закономірності і відмінності перебігу енергетичної залежності ВПЗ-зсуву ліній в атомі рубідію та інших лужних металах (натрію, калію, цезію). Зокрема, показано прямий зв'язок ефекту взаємодії після зіткнення та резонансного збудження автоіонізаційних станів у припороговій області енергій зіткнень.

У **п'ятому розділі** представлені дані з абсолютного перерізу автоіонізації атома рубідію та визначено роль окремих електронних конфігурацій у формуванні цього перерізу. На рис. 4 наведено переріз автоіонізації σ_{atom} атома рубідію в діапазоні енергій первинних електронів від порогу збудження $4p^6$ оболонки до 600 еВ у порівнянні з розрахованими перерізами збудження $4p^6$ і $4s^2$ оболонок. Як бачимо, поведінка

експериментального перерізу характеризується наявністю трьох максимумів при енергіях зіткнень 16, 22 і 113 еВ, відповідно. З аналізу досліджених у роботі функцій збудження та спектрів ежектованих електронів атома рубідію випливає, що переріз автоіонізації атома рубідію формується переважно за рахунок внеску від розпаду кватретних автоіонізаційних станів – у припороговій області і дублетних станів – при більш високих енергіях зіткнень.

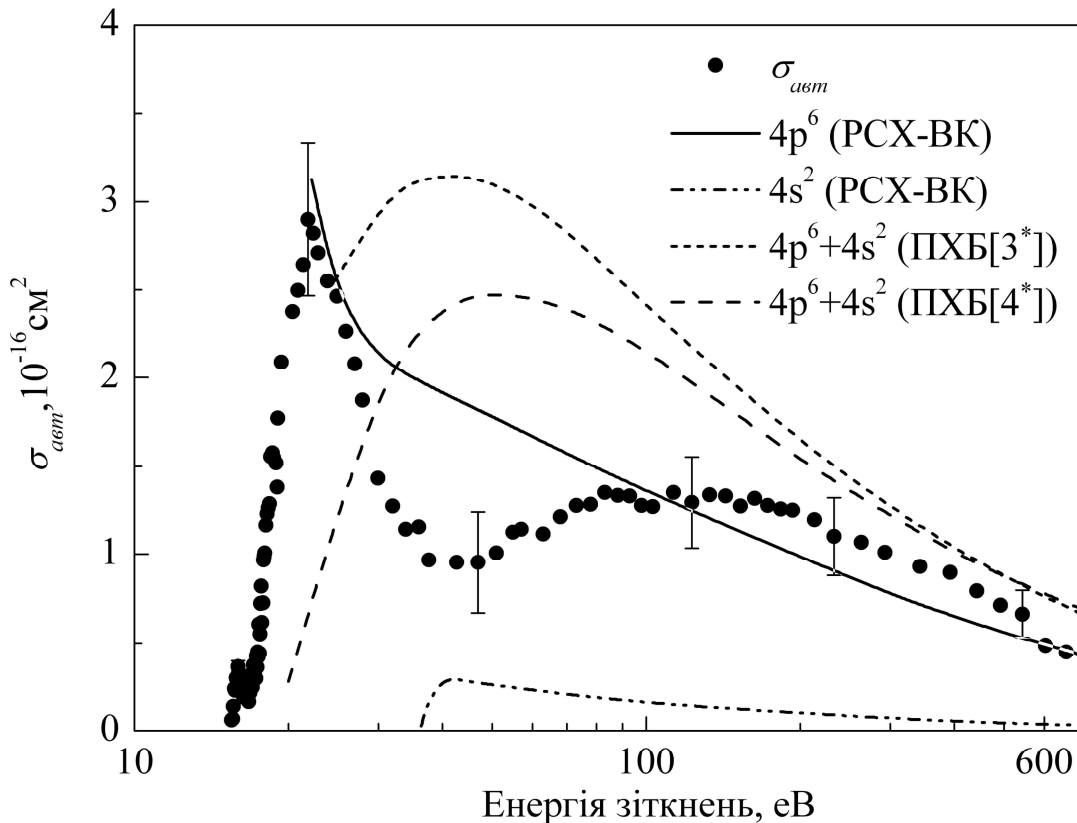


Рис. 4. Переріз автоіонізації $\sigma_{авт}$ [5] при збудженні $4p^6$ оболонки атома рубідію у порівнянні з розрахованими нами в релятивістському наближенні спотворених хвиль із включенням кореляційних поправок (РСХ-ВК) перерізами збудження $4p^6$ і $4s^2$ оболонок [26] та іншими даними [3*, 4*], одержаними в нерелятивістському плоскохвильовому наближенні Борна (ПХБ).

Порівняння одержаного перерізу автоіонізації та перерізу однократної іонізації [5*] надали унікальну можливість вперше визначити сумарний абсолютний переріз процесу прямої іонізації атома рубідію, який у максимумі становить $(7.2 \pm 2.2) \times 10^{-16} \text{ см}^2$. Також вперше встановлено, що відносний внесок перерізу автоіонізації у повний переріз однократної іонізації цього атома електронним ударом становить $32 \pm 5\%$.

Як бачимо з рис. 4, між усіма розрахованими перерізами є суттєва різниця за формою і положенням максимумів. Задовільне узгодження (у межах невизначеності вимірів) наших експериментальних та розрахованих у релятивістському наближенні спотворених хвиль із включенням кореляційних поправок значень перерізу збудження $4p^6$ оболонки спостерігається лише при високих енергіях зіткнень. В області середніх енергій усі теоретичні наближення дають суттєво завищені значення перерізів збудження. У припороговій області наші розраховані дані передбачають резонансне збудження автоіонізаційних станів, що формують переріз автоіонізації $\sigma_{авт}$, проте і вони не можуть повністю описати експериментальний переріз автоіонізації $\sigma_{авт}$ атома рубідію.

Щодо перерізу збудження $4s^2$ оболонки атома рубідію, то він характеризується наявністю припорогового максимуму при енергії 45 eV і подальшим плавним спадом при більш високих енергіях зіткнень. Наші розрахунки показали, що ця оболонка дає внесок у повний переріз збудження не більше 12% [26], а за даними роботи [4*] – навіть менше 1%. Ці оцінки підтверджують той факт, що при експериментальних вимірюваннях спектрів ежектованих електронів нами не було виявлено жодних автоіонізаційних станів, які могли б бути пов'язані зі збудженням глибокої $4s^2$ оболонки атома рубідію.

У п'ятому розділі представлено також результати наших теоретичних розрахунків перерізів іонізації $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ оболонок. Визначено роль кожної з цих оболонок у формуванні повного перерізу однократної іонізації атома рубідію. Шляхом порівняння теоретичних даних між собою, а також при порівнянні їх із експериментальними даними, здійснено аналіз дієвості найбільш поширених теоретичних наближень, а також ролі врахування кореляційних та релятивістських поправок при розрахунках перерізів автоіонізації та однократної іонізації атома рубідію. Встановлено, що наближення бінарних зіткнень є найбільш дієвим методом розрахунку перерізу прямої іонізації $5s$, $4p^6$ та $4s^2$ оболонок, а необхідною умовою задовільного описання процесу автоіонізації для важкого атома рубідію є врахування релятивістських та кореляційних поправок. Також показано, що у припороговій області енергій жодне з відомих на даний час теоретичних наближень не спроможне адекватно описати повний переріз автоіонізації через відсутність врахування при розрахунках резонансного характеру електронного збудження автоіонізаційних станів, який є визначальним у формуванні перерізу автоіонізації атома рубідію.

ВИСНОВКИ

Дана дисертаційна робота присвячена експериментальному дослідженню процесів утворення і розпаду автоіонізаційних станів атома рубідію, а також явищ резонансного збудження і взаємодії після зіткнення, що супроводжують ці процеси. До основних результатів та висновків роботи можна віднести такі:

1. Здійснено реконструкцію експериментальної установки “Електронний спектрометр” шляхом модернізації вакуумної системи та виготовлення нової вихідної електронно-оптичної лінзи монохроматора. Це дозволило з високою точністю дослідити динаміку збудження енергетичних спектрів ежектованих електронів при збудженні $4p^6$ оболонки атома рубідію у діапазоні енергій зіткнень 15-600 еВ.

2. В енергетичних спектрах розсіяних та ежектованих електронів атома рубідію виявлено 82 лінії з порогами збудження від 15.31 до 20.67 еВ. Вперше виявлено 16 нових ліній, що відповідають розпаду атомних автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$, та широку смугу, що відповідає збудженню автоіонізаційного стану молекули Rb_2 . Запропоновано спектроскопічну ідентифікацію для 76 атомних та молекулярного автоіонізаційних станів, визначено схему енергетичного розташування і каналів розпаду цих станів.

3. Вперше одержано енергетичні залежності абсолютних перерізів збудження 11 дублетних та 5 кватретних автоіонізаційних станів атома рубідію, а також автоіонізаційного стану молекули Rb_2 у діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 еВ. Встановлено, що максимальні абсолютні значення ефективних перерізів збудження мають порядок величини 10^{-18} - 10^{-17} см² для атомних автоіонізаційних станів та 10^{-14} см² – для молекулярного автоіонізаційного стану. Показано, що електронне збудження усіх досліджених станів у припороговій області енергій має виключно резонансний характер, пов’язаний з утворенням станів негативних іонів. На основі аналізу парціальної структури перерізів збудження автоіонізаційних станів $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$ визначено енергії збудження та канали розпаду станів негативних іонів, що формують цю структуру, а також здійснено їх спектроскопічну ідентифікацію.

4. Досліджено ефект взаємодії після зіткнення в енергетичних спектрах ежектованих електронів атома рубідію для ліній $(4p^5 5s^2)^2P_{3/2,1/2}$. Встановлено, що максимальні значення ВПЗ-зсуву ліній $^2P_{3/2}$ та $^2P_{1/2}$ становлять 70 і 130 меВ, а значення їх автоіонізаційних ширин складають 4.4 ± 0.7 та 7.0 ± 2 меВ, відповідно.

Показано прямий зв'язок ефекту взаємодії після зіткнення та резонансного збудження автоіонізаційних станів у припороговій області енергій зіткнень.

5. Вперше одержано абсолютне значення та досліджено енергетичну залежність перерізу автоіонізації атома рубідію у діапазоні енергій зіткнення від порогу збудження $4p^6$ оболонки до 600 еВ, визначено роль окремих електронних конфігурацій у формуванні цього перерізу. Встановлено, що відносний внесок перерізу автоіонізації у повний переріз однократної іонізації атома рубідію електронним ударом складає $32 \pm 5\%$. Також вперше тримано енергетичну залежність абсолютного перерізу прямої іонізації атома рубідію електронним ударом, який у максимумі становить $(7.2 \pm 2.2) \times 10^{-16} \text{ см}^2$.

6. На базі проведених теоретичних розрахунків перерізів іонізації $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ оболонок та перерізів збудження $4p^6$, $4s^2$ оболонок визначено роль кожної з цих оболонок у формуванні повного перерізу однократної іонізації атома рубідію. Здійснено аналіз дієвості найбільш поширених теоретичних наближень для розрахунку перерізів автоіонізації та однократної іонізації атома рубідію та встановлено, що наближення бінарних зіткнень є найбільш дієвим методом розрахунку перерізу прямої іонізації $5s$, $4p^6$ та $4s^2$ оболонок, а необхідною умовою задовільного описання процесу автоіонізації для важкого атома рубідію є врахування релятивістських та кореляційних поправок.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1* Borovik A. Excitation cross sections and spectroscopic classification of autoionizing levels in a caesium atom / A. Borovik, A. Kupliauskiene, O. Zatsarinny // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2011. – V. 44. – No. 14. – P. 145203–145209.
- 2*. Sakai H. Extreme-ultraviolet laser spectroscopy of core-excited Rb atoms / H. Sakai, K. Miyazaki // J. Opt. Soc. Am. B. – 1991. – V. 8. – P. 1202–1206.
- 3*. McGuire E.J. Systematics of ns subshell electron ionization cross sections / E.J. McGuire // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 1997. – V. 30. – P. 1563–1587.
- 4*. Kim Y.K. Electron impact ionization cross section of rubidium / Y.K. Kim, J. Migdalek, W. Siegel, J. Bieron // Phys. Rev. A. – 1998. – V. 57, No. 1. – P. 246–254.
- 5*. Tate J. Ionization potentials and probabilities for the formation of multiply charged ions in the alkali vapors and in krypton and xenon / J. Tate, P. Smith // Phys. Rev. – 1934. – V. 46. – P. 773–776.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Роман В.І. Експериментальна установка та перші результати дослідження збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію електронним ударом / В.І. Роман // Науковий вісник УжНУ. – 2011. – № 30. – С. 215–219.
2. Borovik A. The $4p^6$ autoionization cross section of Rb atoms excited by low-energy electron impact / A. Borovik, V. Roman, A. Kupliauskiene // J. Phys. B. – 2012. – V. 45, No. 4. – P. 045204–045214.
3. Electron impact excitation of the lowest doublet and quartet core-excited autoionizing states in Rb atoms / A. Borovik, V. Roman, O. Zatsarinny, K. Bartschat // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2013. – V. 46, No. 1. – P. 015203–015209.
4. Borovik A. The post-collision interaction effect in autoionizing spectra of alkali atoms excited by electron impact / A. Borovik, V. Roman, G. Ogurtsov // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2013. – V. 46, No. 5. – P. 055203–055206.
5. Боровик О.О. Переріз автоіонізації атомів рубідію при збудженні електронним ударом / О.О. Боровик, В.І. Роман, А.В. Купляускієне // Доповіді НАН У. – 2013. – № 3. – С. 58–64.
6. Роман В.І. Енергетичні спектри розсіяних електронів на атомах рубідію / В.І. Роман, В.В. Грицько, О.О. Боровик // Науковий вісник УжНУ. – 2013. – № 34. – С. 139–142.
7. Динаміка збудження автоіонізаційних станів атома рубідію і молекули Rb₂ при електрон-атомних зіткненнях / В. Роман, А. Купліаускієне, О. Боровик, О. Зацарінний // Доповіді НАН У. – 2014. – № 7. – С. 76–81.
8. Роман В.І. Парціальні перерізи іонізації атома рубідію електронним ударом / В.І. Роман, А.В. Купліаускієне, О.О. Боровик // Доповіді НАН У. – 2015. – № 8. – С. 79–83.
9. Roman V. Excitation and ionization of outer shells in Rb by electron impact / V. Roman, A. Kupliauskiene, A. Borovik // J. Phys. B. – 2015. – V. 48. – P. 205204–205209.
10. Resonance excitation of the $(4p^5 5s^2) \ ^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in Rb atoms by electron impact / A. Borovik, V. Ilyashevych, O. Zatsarinny, K. Bartschat // XXVII ICPEAC, 2011, Belfast, Ireland, 2012, J. Phys: Conf. Ser. – V. 388. – P. 052009.
11. Borovik A. Autoionization cross section of Rb atoms excited by low-energy electron impact / A. Borovik, V. Ilyashevych, A. Kupliauskiene // XXVII ICPEAC, 2011, Belfast, Ireland, 2012, J. Phys: Conf. Ser. – V. 388. – P. 042010.
12. Ilyashevych V. Ejected-electron spectra of Rb atoms excited by low-energy electron impact / V. Ilyashevych, A. Borovik, A. Kupliauskiene // XXVII ICPEAC, 2011, Belfast, Ireland, 2012, J. Phys: Conf. Ser. – V. 388. – P. 042019.
13. Borovik A. Ejected-electron excitation functions of the $(4p^5 5s^2) \ ^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states of rubidium atoms excited by 15 to 640 eV electrons / A. Borovik, V. Ilyashevych, A. Kupliauskiene // XXVII ICPEAC, 2011, Belfast, Ireland, 2012, J. Phys: Conf. Ser. – V. 388. – P. 042007.

14. Роман В. Експериментальна установка та перші результати дослідження збудження автоіонізаційних станів атомів рубідію електронним ударом. / В. Роман // В зб.: Програма і тези доповідей Конференції молодих учених та аспірантів «ІЕФ-2011». – Ужгород. – 2011. – С. 132.
15. Electron-impact excitation of the $(4p^5 4d 5s)^4 P_J$ autoionizing states in Rb atoms / V. Roman, R. Tymchyk, A. Kupliauskiene, A. Borovik // Book of abstracts. EGAS 44. – Gothenburg, Sweden. – 2012. – P. 163.
16. Observation of post collision interaction in electron-impact excitation of the $4p^6$ subshell in Rb / V. Roman, A. Borovik, G. Ogurtsov, O. Zatsarinny // Program and abstracts «Eighth International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications: ICAMDATA-8». – Maryland, USA. – 2012. – P. 109.
17. Роман В. Резонансні особливості в перерізі автоіонізації атомів рубідію при збудженні електронним ударом. / В. Роман, О. Боровик // В зб.: Програма і тези доповідей Міжнародній конференції «Новітні напрями в атомній фізиці та спектроскопії» (до 90-річчя від дня народження проф. І.П.Запісочного і 20-річчя створення ІЕФ). – Ужгород. – 2012. – С. 89.
18. Roman V. Excitation functions of high-lying autoionizing states in rubidium by electron impact / V. Roman, A. Borovik, A. Kupliauskiene // XXVII Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC). – Lanzhou, China, 2013. J. Phys: Conf. Ser. – 2014. – V. 488. – P. 042018.
19. Borovik A. The $4p^6$ core excitation of Rb_2 by low energy electron impact / A. Borovik, V. Roman, A. Kupliauskiene // XXVIII Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC). – Lanzhou, China, 2013. J. Phys: Conf. Ser. – 2014. – V. 488. – P. 042005.
20. On spectroscopic classification of autoionizing levels in Rb atoms / A. Kupliauskiene, A. Borovik, G. Kerevicius, V. Roman // XXVIII Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC). – Lanzhou, China, 2013. J. Phys: Conf. Ser. – 2014. – V. 488. – P. 042002.
21. The $4p^6$ electron energy-loss spectrum of Rb atoms / V. Hrytsko, V. Roman, A. Kupliauskiene, A. Borovik // XXVIII Int. Conf. on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC). – Lanzhou, China, 2013. J. Phys: Conf. Ser. – 2014. – V. 488. – P. 042007.
22. Роман В.І. Енергетичні спектри розсіяних електронів на атомах рубідію / В.І. Роман, В.В. Грицько, О.О. Боровик // В зб.: Програма і тези доповідей Конференції молодих учених та аспірантів «ІЕФ-2013». – Ужгород. – 2013. – С. 60–61.
23. Возбуждение метастабильных автоионизационных состояний атома рубидия электронным ударом / В.В. Грицько, В.І. Роман, А.В. Куплиаускиене, А.А. Боровик // Сборник тезисов докладов конференции и школы молодых учёных по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС ХХ. – Воронеж, Россия. – 2013. – С. 222–223.
24. Роман В.І. Динаміка збудження автоіонізаційних станів в атомі рубідію / В.І. Роман // В зб.: Матеріали та програма науково-технічної конференції «ФЕЕ-2014» – Суми. – С. 95.

25. Роман В.І. Електронне збудження стану $(4p^5 4d5s)^4S_{3/2}$ атома рубідію / В.І. Роман // В зб.: Матеріали та програма науково-технічної конференції «ФЕЕ-2014» – Суми. – С. 94.
26. Роман В.І. Експериментальний та теоретичний перерізи автоіонізації атома рубідію / В.І. Роман // В зб.: Матеріали Міжнародної конференції молодих учених та аспірантів «ІЕФ-2015». – Ужгород. – 2015. – С. 224.
27. Roman V. The single ionization cross-section of Rb atoms by electron impact / V. Roman, A. Kupliauskiene, A. Borovik // Abstracts of Contributed Papers, XXIX, 2015, Toledo, Spain, J. of Phys: Conf. Series – 2015. – V. 635. – P. 052004.

АНОТАЦІЯ

Роман В.І. Автоіонізаційні та резонансні явища при електронному збудженні атома рубідію. – 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, 2015.

З використанням методу електронної спектроскопії та техніки електронного та атомного пучків, що перетинаються, вперше досліджені спектри розсіяних та ежектованих електронів атома рубідію у діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження $4p^6$ оболонки до 600 еВ. Із залученням теоретичних розрахунків енергій, перерізів збудження, ймовірностей розпаду станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ вперше здійснено найбільш повну спектроскопічну ідентифікацію ліній у спектрах. Виявлено оптично заборонений автоіонізаційний стан молекули Rb_2 . Одержано енергетичні залежності абсолютних ефективних перерізів збудження атомних та молекулярного автоіонізаційних станів. Встановлено, що у припороговій області процес збудження субвалентної $4p^6$ оболонки має виключно резонансний характер, пов'язаний з утворенням короткоіснуючих станів (резонансів) негативних іонів рубідію. Визначено енергії збудження, спектроскопічну ідентифікацію та канали розпаду цих станів. Досліджено ефект взаємодії після зіткнення в енергетичних спектрах атома рубідію. Одержано енергетичну залежність та абсолютне значення повного перерізу автоіонізації при збудженні субвалентної $4p^6$ оболонки. Визначено максимальний відносний внесок цього процесу в повний переріз однократної іонізації атома рубідію електронним ударом, який становить 32%.

Проведено теоретичні розрахунки перерізів іонізації $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ оболонок та перерізів збудження $4p^6$, $4s^2$ оболонок, визначено роль кожної з

цих оболонки у формуванні повного перерізу однократної іонізації атома рубідію. Також здійснено аналіз дієвості найбільш поширених теоретичних наближень для опису процесів збудження та іонізації атома рубідію.

Ключові слова: атом, іон, негативний іон, субвалентна оболонка, збудження, іонізація, автоіонізація, резонанси.

АННОТАЦІЯ

Роман В.И. Автоионизационные и резонансные явления при электронном возбуждении атома рубидия. – 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, 2015.

Используя метод электронной спектроскопии и технику пересекающихся электронного и атомного пучков, впервые исследованы спектры рассеянных и эжектированных электронов атома рубидия в диапазоне энергий столкновений от порога возбуждения $4p^6$ оболочки до 600 эВ. С привлечением теоретических расчетов энергий, сечений возбуждения, вероятностей распада состояний $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2$ осуществлена спектроскопическая идентификация линий в спектрах. Обнаружено оптически запрещенное автоионизационное состояние молекулы Rb_2 . Получены энергетические зависимости абсолютных эффективных сечений возбуждения атомных и молекулярных автоионизационных состояний. Установлено, что в области пороговых энергий процесс возбуждения субвалентной $4p^6$ оболочки имеет исключительно резонансный характер, связанный с образованием короткоживущих состояний (резонансов) отрицательных ионов рубидия. Определены энергии возбуждения, спектроскопическая идентификация и каналы распада этих состояний. Исследован эффект послестолкновительного взаимодействия в спектрах эжектированных электронов атома рубидия и показано его прямую связь с резонансным возбуждением автоионизационных состояний в припороговой области энергий. Получены энергетическая зависимость и абсолютное значение полного сечения автоионизации при возбуждении субвалентной $4p^6$ оболочки атома рубидия. Определен максимальный относительный вклад этого процесса в полное сечение однократной ионизации атома рубидия электронным ударом, составляющий 32%.

Проведены теоретические расчеты парциальных сечений ионизации $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ оболочек и сечений возбуждения $4p^6$, $4s^2$ оболочек, определена роль каждой из этих оболочек в формировании полного сечения однократной

ионизации атома рубидия. Также осуществлен анализ действенности наиболее распространенных теоретических приближений для описания процессов возбуждения и ионизации атома рубидия.

Ключевые слова: атом, ион, отрицательный ион, субвалентная оболочка, возбуждение, ионизация, автоионизация, резонансы.

SUMMARY

Roman V.I. Autoionization and resonance phenomena in electron impact excitation of rubidium atoms. – Manuscript.

Thesis submitted for the Candidate of Science Degree (in Physics and Mathematics), specialized field 01.04.04 – Physical Electronics. – Uzhgorod National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Uzhgorod, 2015.

Using the electron spectroscopy method and the crossed electron-atom beam technique, the excitation dynamics of scattered and ejected electron spectra in rubidium atoms was investigated in the impact energy region from the excitation threshold of the $4p^6$ subshell up to 600 eV. The spectroscopic classification of lines was performed by using the results of theoretical calculations of excitation energies, cross-sections, and decay rates for the $4p^5n_1l_1n_2l_2$ states. The optically forbidden autoionizing state in Rb_2 molecule was revealed. The absolute effective excitation cross-sections for atomic and molecular autoionizing states were obtained. The strong resonance excitation was revealed in the near-threshold impact energy region caused by the formation of short-living states (resonances) of negative rubidium ions. The excitation energies, spectroscopic classification and decay channels for such states were determined. The effect of the post-collision interaction in ejected-electron spectra was investigated. The absolute value of the total autoionization cross-section and its impact-energy dependence were obtained for excitation of the $4p^6$ subshell. The maximal relative contribution from autoionization to the total single ionization cross-section by electron impact was estimated to be 32% for rubidium atoms.

The theoretical calculations of the ionization cross-sections of the $5s$, $4p^6$, $4s^2$, $3d^{10}$ subshells and excitation of the $4p^6$, $4s^2$ subshells were performed and their role in formation of the total single ionization cross-section of rubidium atom was determined. Also, the analysis of the most used theoretical approximations for describing the processes of excitation and ionization of rubidium atoms was performed.

Key words: atom, ion, negative ion, subvalence shell, excitation, ionization, autoionization, resonances.

Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Times New Roman.
Друк офс. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 0,89.
Тираж 100 шт. Замовлення № 71.

Видавництво «Бреза».
м. Ужгород, вул. Університетська, 21/220. Тел./факс: (0312) 64-37-22
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4815 від 15.06.2011р.
Друк: ФОП Сабов А.М., тел.: 050-43-22-437