ПЕРЕРІЗИ ЗБУДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ SrII З АТОМНИХ МЕТАСТАБІЛЬНИХ СТАНІВ ЕЛЕКТРОНАМИ

Т.А. Снігурська, М.О. Маргітич, І.І. Шафраньош

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул.Волошина, 54

Приводяться результати експериментальних досліджень взаємодії електронів з метастабільними атомами стронцію, в результаті чого відбувається одночасно іонізація із збудженням. Отримано величини перерізів взаємодії, які сягають величин ~ 10^{-16}см^2, і їх енергетичні залежності. Дано аналіз механізмів взаємодії.

Вступ

Дана стаття присвячена експериментальним дослідженням непружної взаємодії електронів з метастабільними атомами стронцію, в результаті чого відбувається одночасно іонізація із збудженням. На даний час в літературі відсутні будь-які відомості як про величини перерізів подібних зіткнень, так і про їх енергетичні залежності. Проте такі дані необхідні для різних галузей науки і техніки, які використовують плазмові середовища. Достеменно відомо, що метастабільні атоми відіграють значну роль у великому розмаїтті процесів, які мають місце у низькотемпературній плазми.

На даний час у нашій лабораторії отримано дані зі взаємодії електронів з метастабільними атомами лужноземельних елементів (збудження, іонізація, надпружне розсіяння) [1-3], які свідчать про особливості механізмів перебігу подібних процесів. Вже доведено, як експериментально, так і теоретично, що при цьому значно збільшуються величини перерізів взаємодій (до двох порядків і більше в залежності від атома, величини енергії і типу процесу), а також змінюються їх енергетичні залежності [1-3]. У той же час залишається ще багато нез'ясованих питань навіть у проведених раніше дослідженнях, не кажучи вже про нові об'єкти у метастабільних станах, що, безумовно, пов'язано з надзвичайною складністю експериментальних досліджень: отримання пучків метастабільних атомів достатньої концентрації, інтенсивних монокінетичних пучків електронів, реєстрації слабких корисних сигналів на фоні потужних супутніх процесів.

Величини перерізів утворення іонів стронцію у збуджених станах є константами взаємодії, крім того, такі дані дозволяють вияснити деякі механізми перебігу процесу повної іонізації метастабільних атомів електронами.

Техніка і методика досліджень

Експерименти проводились оптичним методом з використанням техніки пучків метастабільних атомів стронцію і електронів, що перетинаються. В якості джерела електронів використовувалась п’ятиелектродна електронна гармата з оксидним катодом. За її допомогою отримувалися пучки електронів з силою струму ~ 20мкА і монокінетичністю ~ 0,5 еВ (ширина на піввисоті). Пучок метастабільних атомів Sr генерувався розрядним способом: атоми в основному стані (отримані ефузійним методом) пропускались через розрядну камеру, де проходило їх ефективне конвертування у збуджені стани. Короткоживучі збуджені стани розпадалися в місці виникнення, заряджені частинки, які утворювались в розряді, збиралися конденсатором. Тому на виході із розрядної камери пучок складався з атомів в основному і метастабільних (довгоживучих) станах. Концентрація мета-

стабільних атомів (яка складала ~$5\cdot10^{-9}$см$^{-3}$) визначалася абсорбційним способом за допомогою методу одного дзеркала. Калібрування енергетичної шкали електронів здійснювалось за порогами збудження атомних ліній з основних станів з точністю ~ 0,2 еВ. Система реєстрації працювала у режимі рахунку окремих фотоімпульсів з використанням техніки модуляції електронного пучка. В якості оптичного приладу використовувався МДР-23. Блок-схема експериментальної установки представлена на рис. 1.

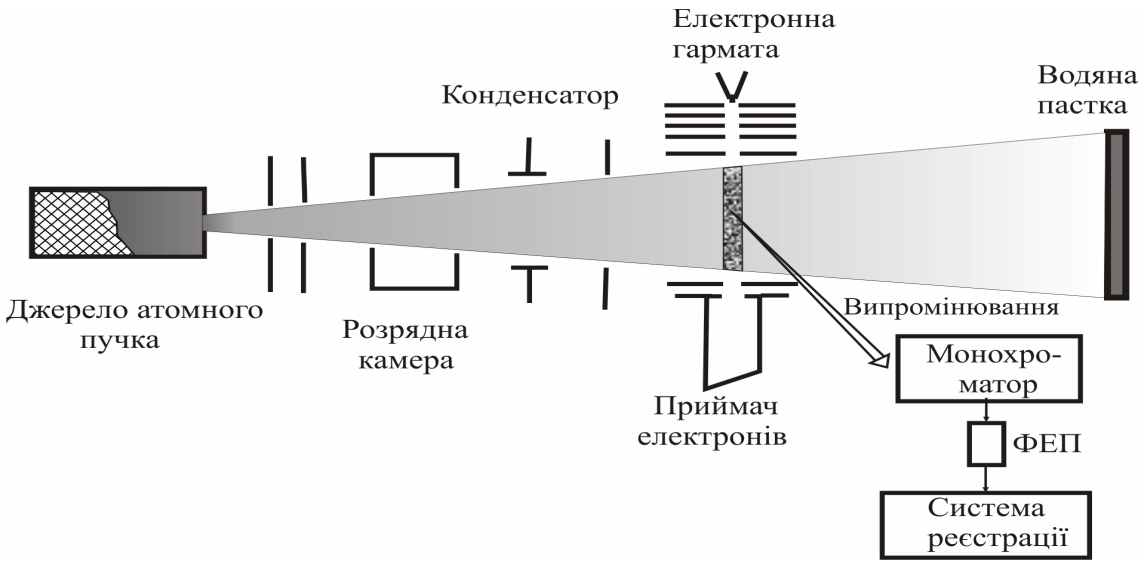

Рис.1. Блок-схема експериментальної установки

Похибка у визначенні абсолютних величин перерізів збудження іонних ліній складала ~50 %, а відносна похибка визначення енергетичних залежностей не перевищувала ~8 %. Докладно експериментальна установка і методика проведення вимірів описані, наприклад, в [1].

Результати досліджень і їх обговорення

У результаті експериментальних досліджень були визначені абсолютні перерізи збудження Q^m найбільш інтенсивних спектральних переходів (СП) SrII для енергії електронів 15 еВ (див. таблицю і рис. 2). У якості реперу був вибраний раніше виміряний нами [4] переріз збудження лінії λ481,1 нм SrI із метастабільних станів. Бачимо, що перерізи сягають величин ~ 10^{-16}см^2 (для резонансного дублету іона). Для порівняння у таблиці наведено величини перерізів тих самих СП, отриманих за допомогою розрахунків, виконаних методом сильного зв'язку у роботі [5]. Крім того, там же приведено дані, отримані нами в результаті перерахунку перерізів збудження СП із основного стану Q^o атому Sr, виміряних у роботах [6,7], за формулою

$$Q^m = \frac{I^m}{I^o}\frac{N^o}{N^m}Q^o \qquad (1),$$

де $\frac{I^m}{I^o}$ – відносні інтенсивності спектральної лінії, збудженої із метастабільного і основного станів (безпосередньо визначалися нами на експерименті); $\frac{N^o}{N^m}$ – відношення концентрацій атомів в основному і метастабільних станах.

Видно, що величини перерізів помітно відрізняються між собою. Простих пояснень цьому немає. Можливо, це пов'язано з різними підходами при вимірах і розрахунках цих величин у кожному конкретному випадку. На підтримку нашої методики і її результатів, звернемо увагу на

такий факт. Переріз іонізації атомів стронцію із метастабільних станів електронами (для 15 еВ) [8] складає ~$2\cdot10^{-15}$ $см^2$. Сумарний переріз збудження виміряних нами спектральних ліній дорівнює

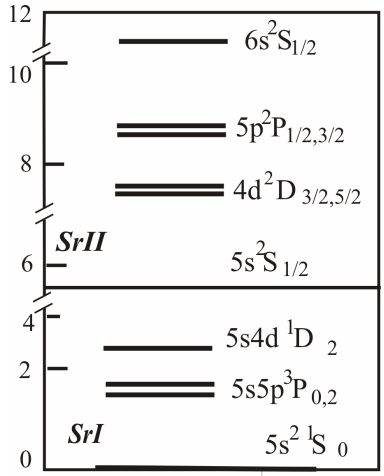

Рис.2. Спрощена діаграма спектральних рівнів атому та іону стронцію.

~$2\cdot10^{16}см^2$, що відповідає ~10% повного перерізу іонізації. У схожих експериментах, проведених нами раніше для атома магнію, ця величина сягала 30% [9]. Проте, це цілком закономірно: іон стронцію має метастабільний ^2D -стан, який лежить нижче резонансних ^2P- станів і ^2S- рівня (рис. 2), і, безумовно, значна частина іонів утворюється саме в ^2D – станах, розпад яких в оптичному каналі заборонений, і тому нами не спостерігався. Якщо врахувати збудження іонних $4^2D_{3/2,5/2}$ – станів, то оцінки збільшаться. У іона магнію подібний рівень знаходиться вище резонансних рівнів іона, і його внесок суттєво нижчий.

На рис. 3 (а,б) приведені енергетичні залежності перерізів електронного збудження (функція збудження – ФЗ) обох компонент резонансного дублету іона стронцію ($5^2S_{1/2} – 5^2P_{3/2,1/2}$) із метастабільних (криві 1) і основного (криві 2) станів атома. Проаналізуємо спочатку ФЗ λ407,6 нм ($5^2S_{1/2} – 5^2P_{3/2}$) – рис. 3а. Видно, що хід ФЗ з метастабільних станів не монотонний, він характеризується складною структурою у вигляді максимумів і мінімумів. При енергії ~ 9 еВ спостерігається основний максимум, а при енергіях ~ 9,8; 10,3; 11,2; 12,2;16; 18,3 еВ – додаткові злами і невеликі максимуми. Хід ФЗ з основного стану монотонний, основний максимум досягається при енергії ~ 30еВ, а структурні особливості практично відсутні.

Таблиця 1.

Ефективні перерізи електронного збудження спектральних ліній SrII з атомних метастабільних станів

№	Перехід, λ(nm)	$E_{збудж.}$, еВ	Q_{15}^m, 10^{-17}, $см^2$	Q_{15}^m, 10^{-17}, $см^2$ [5]	Q_{15}^m, 10^{-17}, $см^2$ [6]	Q_{15}^m, 10^{-17}, $см^2$ [7]
1	$5^2S_{1/2} – 5^2P_{3/2}$ 407,6	6,93	10	42	20	26
2	$5^2S_{1/2} – 5^2P_{1/2}$ 421,5	6,82	4	17	9	13,5
3	$5^2P_{3/2} – 6^2S_{1/2}$ 430,5	9,8	1,4	6	4,5	
4	$5^2P_{1/2} – 6^2S_{1/2}$ 416,1	9,8	0,6	2,5	1,3	

На рис. 3б приведена ФЗ другої компоненти резонансного дублету λ421,5 нм ($5^2S_{1/2} – 5^2P_{1/2}$). Певною мірою її поведінка подібна до ФЗ λ407,6 нм. Так, вона теж характеризується складною залежністю з певною кількістю максимумів і мінімумів, які спостерігаються при тих самих енергіях, що говорить про єдиний механізм їх утворення. Основний максимум знаходиться при енергії ~ 12 еВ. Хід ФЗ з основного стану є монотонним і повністю повторює хід ФЗ λ407,6 нм, що природньо: це – дві компоненти одного дублету. У той же час звертає на себе увагу факт, що енергетичні залежності перерізів компонент дублету з метастабільних станів відрізняються одна від одної, що було несподіваним. Ми припускаємо, що при збудженні $^2P_{1/2}$-

рівня внесок обмінної взаємодії незначний, тоді як при збудженні $^2P_{3/2}$ - рівня він стає переважним. Внаслідок цього максимум ФЗ λ407,6 нм ($5^2S_{1/2}$ – $5^2P_{3/2}$) знаходиться біля порогу. Подібна ситуація спостерігалась нами і для атома талію [10].

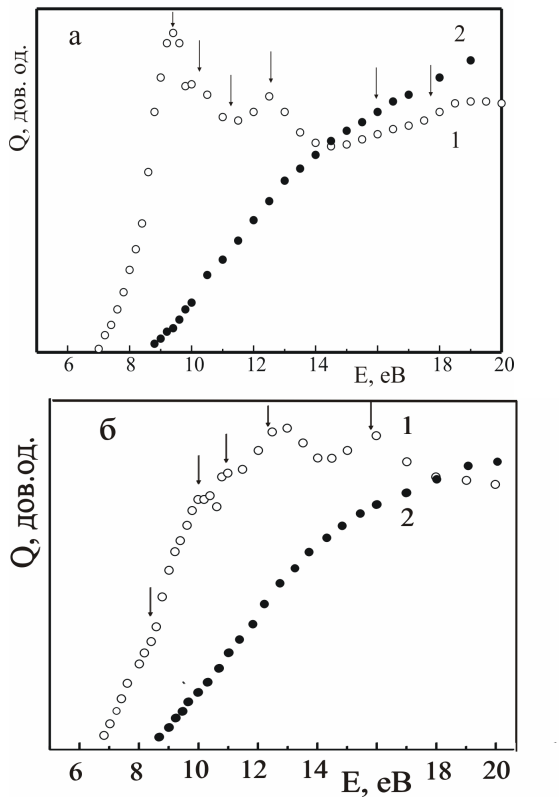

Рис.3. ФЗ спектральних ліній Sr II з метастабільних (криві 1) і основного (криві 2) станів електронним ударом:
а – $5^2S_{1/2}$ – $5^2P_{3/2}$ 407,6 нм;
б – $5^2S_{1/2}$ – $5^2P_{1/2}$ 421,5 нм.

Підсумовуючи вищесказане, зробимо деякі висновки. Різний хід ФЗ з основного і метастабільного станів обумовлений різними механізмами утворення збуджених іонів у цих випадках. Це також підтверджувалось і даними роботи [9] зі збудження іонів магнію із атомних метастабільних станів. Отримані результати дозволяють нам провести аналіз механізмів утворення іонів. На рис. 4 приведена функція повної іонізації (ФІ) електронами атомів стронцію з метастабільних станів [8] (крива 2). Для порівняння там же наведено сумарну ФЗ обох компонент резонансного дублета іона стронцію (криві приведені в відносних одиницях). Видно, що деякі структурні особливості на обох кривих, включаючи головний максимум, спостерігаються при одних енергіях. Так, при енергії ~7еВ на кривій повної іонізації є злам, пов'язаний зі включенням процесу утворення іонів у збуджених $^2P_{1/2,3/2}$ –станах (поріг кривої 1 на рис.4). Інші особливості, за аналогією з атомом магнію, можливо, пов'язані з утворенням і розпадом автоіонізаційних станів. Але для атому Sr таких даних вкрай недостатньо.

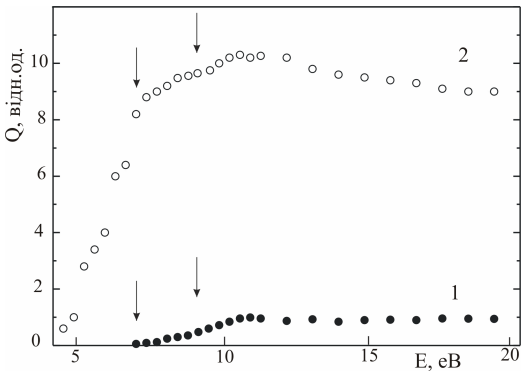

Рис.4. Функція повної іонізації атома стронцію (2) [8] та сумарний переріз збудження резонансного дублету SrII (1) з метастабільних станів електронами.

Таким чином, можна стверджувати (див. табл.), що і для атома стронцію значна доля іонів (більше 10%) при взаємодії метастабільних атомів з електронами утворюється у збуджених станах.

Література

1. I.I. Shafranyosh, T.A. Snegurskaya, N.A. Margitich, S.P. Bogacheva, V.I. Lengyel, O.I. Zatsarinny, *J.Phys.B: At .Mol.Opt. Phys*. **30**, 2261 (1997)
2. I.I. Shafranyosh, M.O. Margitich, *J. Phys.B: At. Mol. Opt. Phys*. **33**, 905 (2000)
3. І.І. Шафраньош, В.І. Марушка, *Журн. фіз. досл*. **4,** 415 (2000)

4. И.С. Алексахин, И.И. Шафраньош, *Оптика и спектр*. **42**, 773 (1977)
5. V. Gedeon, V. Lengyel, O. Zatsarinny, C.A. Kocher, *Phys.Rev.A*. **56**, 3753 (1997)
6. В.П. Стародуб, И.С. Алексахин, И.И. Гарга, И.П. Запесочный, *Опт. Спектр*. **35**, 603 (1973)
7. S.T. Chen, D. Leep, A. Gallagher, *Phys.Rev.A* **13**, 947 (1976)
8. М.О. Маргітич, І.І. Шафраньош, *Укр.Фіз.Журн*. **45**, 31 (2000)
9. Т.А. Снегурская, Н.А. Маргитич, И.И. Шафраньош, *Опт. Спектр*. **88**, 733 (2000)
10. І.І. Шафраньош, Т.А. Снегурская, И.С. Алексахин, *Опт. Спектр*. **68**, 262 (1990)

ELECTRON EXCITATION CROSS SECTIONS FOR SPECTRAL TRANSITIONS IN SrII OUT OF ATOMIC METASTABLE STATES

T.A. Snigurska, M.O. Margitich, I.I. Shafranyosh

Uzhgorod National University, 88 000, Uzhgorod, Voloshyn street, 54

The results of experimental studied of electron interaction with metastable strontium atoms leading to the simultaneous ionization with excitation are presented. Cross section values reaching ~10^{-16}cm^2, as well as their energy dependences are obtained. The interaction mechanisms are discussed.