

# ПЕРЕРІЗИ ЗБУДЖЕННЯ, ІОНІЗАЦІЇ ТА НАДПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ У ПРОЦЕСАХ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОНІВ ІЗ МЕТАСТАБІЛЬНИМИ АТОМАМИ СТРОНЦЮ

Т.А. Снігурська, М.О. Маргітич, В.І. Марушка

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

Досліджено процеси збудження, іонізації та надпружного розсіяння при взаємодії електронів із метастабільними атомами стронцію. Отримані абсолютні перерізи взаємодій сягають значень  $\sim 10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Обговорено особливості перебігу кожного процесу.

## ВСТУП

Вивчення процесів взаємодії електронів із збудженими атомами має як фундаментальне, так і практичне значення в сучасній атомній фізиці. З практичної точки зору такі дані необхідні для різних галузей науки і техніки, які використовують плазмові середовища, де концентрації збуджених (зокрема, метастабільних) атомів є значними. З фундаментальної точки зору відомості про перебіг таких процесів є необхідними для побудови адекватних фізичних моделей електронно-атомних взаємодій.

Вагомий внесок у вивчення непружних взаємодій електронів з атомами металів зробив проф. Алексахін І.С. та очолювана ним наукова група. Інтелектуальною вершиною цих досліджень І.С. Алексахін вважав встановлення загальних закономірностей перебігу процесів електрон-атомних зіткнень.

В даній роботі здійснено спробу аналізу комплексних досліджень взаємодій електронів з метастабільними  $5^3P_{0,2}$  атомами стронцію, в результаті чого відбуваються процеси збудження, іонізації та надпружного розсіяння. Згадані процеси охоплюють обидва класи непружних зіткнень (I – іонізація та збудження; II – надпружне розсіяння). Кожен з них має свої

механізми перебігу і особливості в проведенні експериментальних досліджень.

## ТЕХНІКА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Дослідження процесів взаємодій електронів з метастабільними атомами стронцію вивчалось в умовах електронного і атомного пучків, що перетинаються, за допомогою оптичного і електричного методу велась реєстрація продуктів реакцій (оптичного випромінювання, утворених іонів та надпружно розсіяних електронів). Основними вузлами установки були: джерело метастабільних атомів стронцію; джерела електронних пучків; п'ятиелектродна електронна гармата та монохроматори електронів (трохоїдний та циліндричний  $90^\circ$ ); системи реєстрації продуктів взаємодій, які для кожного процесу мали свої особливості. Ідеї досліджень і методики експериментів детально представлені в роботах [1-3].

Концентрація метастабільних атомів в області взаємодії з електронами визначалася абсорбційним способом за допомогою методу одного дзеркала. Для триплетних  $5s5p^3P_{0,2}$  – станів вона складала  $\sim 5 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, для синглетних  $5s4d^1D_2$  – оцінювалася величиною  $\sim 3 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>, що

відповідає порогу чутливості абсорбційного методу.

При дослідженні процесів збудження метастабільних атомів стронцію в якості джерел електронних пучків використовувались п'ятиелектродна електронна гармата та циліндричний  $90^\circ$  монохроматор. За їх допомогою отримували пучки електронів з силою струму  $\sim 20 \mu\text{A}$  і  $1 \mu\text{A}$  та монокінетичністю  $\sim 0,5 \text{ eV}$  і  $\sim 0,2 \text{ eV}$  (ширина на піввисоті) для гармати та монохроматора, відповідно. Система реєстрації працювала в режимі лічби окремих фотоімпульсів з модуляцією електронного пучка. Оптичним приладом слугував МДР-23. Похибка у визначенні абсолютних величин перерізів збудження спектральних ліній складала  $\sim 50\%$ , а відносна похибка визначення енергетичних залежностей не перевищувала  $\sim 8\%$  [1].

В експериментах з іонізації для створення електронного пучка використовувався  $90^\circ$ -ний електростатичний циліндричний монохроматор електронів, який давав змогу отримувати пучок електронів із силою струму в межах  $1 \div 1,5 \mu\text{A}$  і монокінетичністю  $\sim 0,2 \text{ eV}$ . Іони детектувалися в аналоговому режимі за допомогою відповідної системи реєстрації [2]. Похибка у визначенні величини абсолютного перерізу іонізації складала  $\sim 60\%$ , а відносна похибка визначення енергетичних залежностей перерізу іонізації оцінюється величиною  $\sim 12\%$ .

При вивченні надпружного процесу пучок електронів генерувався трохоїдним електронним монохроматором (ТЕМом), створеним на основі робіт [4,5]. Енергетична неоднорідність пучка електронів становила  $0,1 \text{ eV}$  при силі струму пучка  $8 \cdot 10^{-8} \text{ A}$  в області енергій до  $2 \text{ eV}$ . Напруженість електричного поля  $E$  та індукція магнітного поля  $B$  складала відповідно  $\sim 1,2 \cdot 10^2 \text{ V/m}$  і  $\sim 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Tl}$ . Аналіз енергій розсіяних електронів здійснювався енергоаналізатором гальмівного типу [6], який представляв собою систему з трьох плоских електродів з круглими діафрагмами з колектором електронів. Потенціали крайніх електродів аналі-

затора задавалися однаковими і дорівнювали прискорюючому потенціалу, а на середній електрод подавався затримуючий від'ємний потенціал. Роздільна здатність аналізатора при енергії  $2 \text{ eV}$  досягала величини  $5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$ .

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Атом стронцію належить до групи лужноземельних елементів і характеризується наявністю двох валентних  $s$ -електронів на зовнішній  $5s^2$  оболонці. Основний стан атома  $5s^2 \ ^1S_0$ . При збудженні одного з  $s$ -електронів виникають електронні конфігурації типу  $5sn \ ^l$  (квантове число  $n'$  приймає послідовні цілі значення) з утворенням двох систем термів – синглетної і триплетної; одночасне збудження обох  $s$ -електронів також призводить до виникнення синглетних та триплетних термів, однак їх положення зміщене відносно термів одноелектронного збудження (так звані зміщені терми). Класифікація утворених квантових станів для атомів Sr проводиться у наближенні  $LS$ -зв'язку. Існування переходів між термами різної мультиплетності – так звані інтеркомбінаційні переходи, свідчить про помітну спін-орбітальну взаємодію для даного атома. Метастабільні непарні рівні  $5s5p \ ^3P_0$  та  $5s5p \ ^3P_2$ , утворені при збудженні одного з  $s$ -електронів, найбільш низьколежачі, з енергіями збудження  $1,78 \text{ eV}$  та  $1,85 \text{ eV}$ , відповідно. Крім того, атом Sr має синглетний парний метастабільний стан  $5s4d \ ^1D_2$  з енергією збудження  $2,50 \text{ eV}$ .

**Збудження.** У результаті дослідження процесу збудження метастабільних атомів стронцію електронами були отримані абсолютні величини перерізів спектральних переходів та їх енергетичні залежності в біляпороговій області енергій.

У таблиці 1 наведені результати вимірів. Видно, що найбільш ефективно у атома стронцію збуджуються перші члени різкої і дифузної серій. Максимальний пе-

період при енергії 30 еВ має перехід  $5s5p^3P_2 - 5s6s^3S_1$  (аналог резонансного переходу) і дорівнює  $1,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . У атома стронцію спостерігається значна кількість переходів із зміщених термів конфігурацій  $5p^2, 4d5p$ , які характеризуються великою ефективністю і найбільшим значенням величини  $Q_{30}^m / Q_{30}^o$ , яка характеризує відношення перерізів збудження з метастабільних і основного станів при енергії 30 еВ для одних і тих же спектральних переходів (див. табл. 1).

Звернемо увагу на ту обставину, що у атома стронцію не зафіксовано суттєвого зростання перерізів збудження спектральних переходів із метастабільних станів у синглетну систему термів. Це може бути зумовлено тим фактом, що їх збудження з триплетних метастабільних станів відбувається тільки шляхом обмінної взаємодії,

а з основного стану – переважно шляхом прямого збудження. Для триплетних рівнів спостерігається зворотна картина. А імовірність прямого збудження значно перевищує імовірність обмінної взаємодії.

У таблиці 1 також наведені результати розрахунків, виконаних в наближенні сильного зв'язку з врахуванням 6 станів мішені [7]. Аналіз таблиці показує, що в більшості випадків експериментальні величини  $Q_{\text{експ}}$  в кілька разів перевищують теоретичні  $Q_{\text{теор}}$  дані (наприклад, для рівня  $^3F_2$   $Q_{\text{експ}} > Q_{\text{теор}}$  майже в ~10 разів; для рівня  $^3F_3$   $Q_{\text{експ}} > Q_{\text{теор}}$  в ~7 разів; для рівня  $^3S_1$   $Q_{\text{експ}} > Q_{\text{теор}}$  в ~4 рази) за винятком збудження зміщеного рівня  $5p^2\ ^3P_2$ , для якого теоретичне  $Q_{\text{теор}}$  значення перерізу в 4 рази перевищує експериментальне  $Q_{\text{експ}}$ . В цілому можна констатувати задовільне узгодження між експериментом і теорією.

Таблиця 1. Абсолютні ефективні перерізи збудження спектральних переходів атомів стронцію з метастабільних станів.

№	Перехід	$\lambda, \text{ нм}$	$E_{зб}, \text{ еВ}$	$Q_{30}^m, 10^{-17} \text{ см}^2$	$Q_{30}^m / Q_{30}^o$	$Q_{30}^m, 10^{-17} \text{ см}^2$ [7]
1	$5s5p^3P_2 - 5s6s^3S_1$	707,0	1,8	150	190	37,9
2	$5s5p^3P_2 - 5s7s^3S_1$	443,8	2,6	1,7	50	–
3	$5s5p^3P_2 - 5s6d^3D_1$	496,2	2,5	60	100	45
4	$5s5p^3P_2 - 5s6d^3D_1$	403,2	3,1	14	125	–
5	$5s4d^3D_3 - 5s4f^3F_1$	489,2	3,0	10	250	5,2
6	$5s5p^3P_2 - 5p^2\ ^3P_2$	481,1	2,6	11	400	46,5
7	$5s4d^3D_3 - 4d5p^3F_4$	640,8	2,4	38	350	8,83
8	$5s4d^3D_2 - 4d5p^3F_3$	650,4	2,3	13	40	1,8
9	$5s4d^3D_1 - 4d5p^3F_2$	661,7	2,3	21	80	2,21
10	$5s4d^1D_2 - 4d5p^1D_2$	730,9	2,4	130	80	–

Примітка:  $E_{зб}$  – енергія збудження переходу;

$Q_{30}^m$  – величина перерізу збудження з метастабільних станів при енергії 30 еВ;

$Q_{30}^m / Q_{30}^o$  – відношення перерізів збудження з метастабільних і основного станів при енергії 30 еВ.

Енергетичні залежності збудження (функції збудження –ФЗ) деяких спектральних ліній атома стронцію з метастабільних станів електронами біля порогу представлені на рис. 1. Звертає на себе

увагу той факт, що на всіх кривих чітко проявляються особливості у вигляді окремих максимумів (резонансів), величини перерізів котрих сягають значень  $\sim 1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Енергетичне положення більшої

частини максимумів на різних кривих (енергії 2,65; 3,00; 3,40; 3,60; 3,90 eV) співпадає з точністю  $\pm 0,07$  eV [8]. Це може свідчити про єдиний механізм заселення цих рівнів при взаємодії електрона з метастабільним атомом. На наш погляд, цим механізмом може бути ефективне створення високозбуджених короткоживучих станів негативного іону, при розпаді яких відбувається додаткове заселення вихідних рівнів атома, що ми і спостерігаємо на їх перерізах збудження у вигляді особливостей.

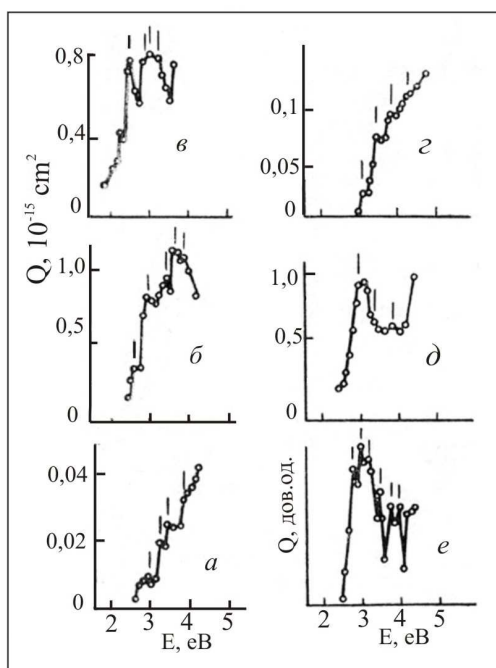


Рис. 1. ФЗ спектральних ліній Sr: *a* – 481,1 нм ( $5s5p\ ^3P_2-5p^2\ ^3P_2$ ); *б* – 730,9 нм ( $5s4d\ ^1D_2-4d5p\ ^1D_2$ ); *в* – 707,0 нм ( $5s5p\ ^3P_2-5s6s\ ^3S_1$ ); *г* – 489,2 нм ( $5s4d\ ^3D_3-5s4f\ ^3F_3$ ); *д* – 640,8 нм ( $5s4d\ ^3D_3-4d5p\ ^3F_4$ ); *е* – 640,8 нм, виміряна за допомогою  $90^\circ$  монохроматора електронів.

**Іонізація.** В експериментах з вивчення іонізації атомів стронцію із триплетних метастабільних станів визначалась величина абсолютного перерізу іонізації та залежність його від енергії налітаючих електронів (функція іонізації).

Енергетичні залежності перерізів іонізації атомів стронцію з триплетних метастабільних та з основного станів предста-

влені на рис. 2. По осі абсцис відкладено енергію налітаючих електронів, а по осі ординат – величина перерізу іонізації в довільних одиницях.

В таблиці 2 приведено абсолютне значення перерізу іонізації метастабільних атомів стронцію, яке визначалося при енергії електронів 12,5 eV, та відношення перерізу іонізації із метастабільних та із основного станів ( $Q_i^m/Q_i^o$ ) при цій самій енергії.

Таблиця 2. Ефективний переріз іонізації атомів стронцію з метастабільних станів.

Початковий стан	$Q_i^m \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$	$Q_i^m / Q_i^o$
$5s5p\ ^3P_{0,2}$	2,1	2,8

Використання в даних експериментах електронного монохроматора дозволило розділити на функції іонізації атомів із метастабільних станів детальну структуру.

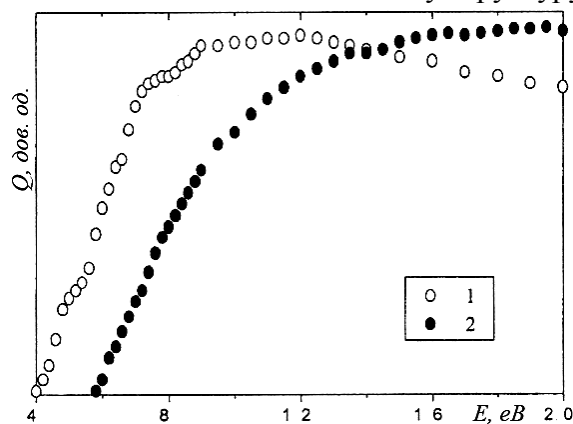


Рис. 2. Функції іонізації атомів стронцію із триплетних метастабільних (крива 1) та із основного (крива 2) станів.

Як видно з рис. 2 (крива 1), енергетична залежність перерізу іонізації із триплетних метастабільних станів характеризується пологим максимумом в області енергії електронів  $E \sim 11$  eV, структурою при  $E \sim 4,4 \div 5,7$  eV, зломами при  $E \sim 5,7$  eV та  $E \sim 6,8$  eV. Енергетична залежність перерізів іонізації атомів із основного стану характеризується гладкою безструктурною кривою, що монотонно зростає. Наявність

структури, зломів, додаткових максимумів на кривій 1 вказує на особливі механізми утворення іонів із триплетних метастабільних станів атома стронцію, які відсутні при іонізації атома із основного стану. Ці механізми пов'язані, на нашу думку, з тим, що іонізація метастабільних  $5s5p^3P_{0,2}$ -атомів стронцію може відбуватися як внаслідок відривання зовнішнього р-електрона (р-іонізація), так і в результаті процесів, в яких приймає участь більш глибокий s-електрон (s-іонізація).

Саме включення процесу s-іонізації приводить до появи на енергетичній залежності перерізу іонізації метастабільних атомів складної структури, оскільки крива 1 на рис.2 відображає сумарну іонізацію атома стронцію із триплетних метастабільних станів.

Дані таблиці 2 свідчать про те, що переріз іонізації метастабільних атомів стронцію в  $\sim 2,8$  раз перевищує переріз іонізації атомів із основного стану.

**Надпружене розсіяння.** Запропонований методичний підхід дозволив вперше визначити енергетичну залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах стронцію  $\sigma^s(E)$ , яка визначалася як відношення струму надпружно розсіяних електронів до струму пучка налітаючих електронів в залежності від величини прискорюючого потенціалу. Результат експериментів показаний на рис. 3. Абсолютна величина  $\sigma^s$  була знайдена для енергії електронів 0,6 еВ і в області максимуму досягає значення  $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Процедура її визначення детально описана в роботі [3]. Під  $\sigma^s$  слід розуміти частину інтегрального перерізу надпружного розсіяння електронів в діапазоні кутів розсіяння  $\pm \alpha$ , межі якого визначаються кутовим розділенням аналізатора ( $\alpha=0,2 \div 0,3$  рад). Відносні похибки при знаходженні величин  $\sigma^s(E)$  та  $\sigma^s$  не перевищували, відповідно, 8% і 60%.

Аналіз рис. 3 показує, що отримана залежність  $\sigma^s(E)$  має помітну резонансну структуру у вигляді вузького максимуму при енергії 0,45 еВ. Наявність такої структури однозначно вказує на складний механізм перебігу процесу надпружного розсіяння електронів. На нашу думку, виявлену структуру слід пов'язати із впливом процесу утворення негативного іона Sr<sup>-</sup>. Підставою для такого твердження є, зокрема, виявлення резонансної структури у перерізах збудження із метастабільних  $5s5p^3P_{0,2}$  –станів атома стронцію [8]. Автори [8] пов'язують природу структури із процесами утворення та розпаду станів негативного іона Sr. Подібне явище спостерігалось нами і при зіткненнях електронів з іншими метастабільними атомами, зокрема, Mg [9].

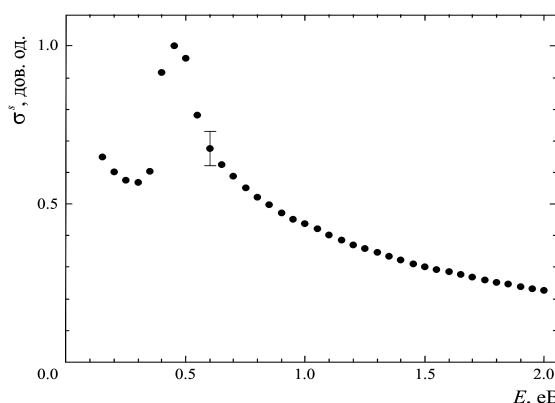


Рис. 3. Енергетична залежність ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах стронцію  $\sigma^s(E)$ .

## ВИСНОВКИ

Підсумовуючи сказане, можна констатувати наступне. По-перше, всі три вивчені процеси мають значну ефективність: перерізи збудження, іонізації та надпружного розсіяння у випадку, коли мішенню є метастабільні атоми, сягають величин  $\sim 10^{-15} \text{ см}^2$  і в декілька разів перевищують відповідні значення перерізів процесів, коли в якості мішені виступають атоми Sr в основному стані. Більше того, якщо просумувати величини всіх знайдених перері-

зів взаємодій, то за порядком отримане значення сумірне з величиною газокінетичного перерізу. По-друге, особливості, які проявляються у вигляді складної структури на енергетичних залежностях перерізів взаємодій електронів на метастабільних атомах Sr, свідчать про наявність додаткових складних механізмів перебігу цих процесів, які відсутні у випадку використання в якості мішені атомів Sr в основному стані. Так, в досліджуваних процесах можуть приймати участь як збуджені зовнішні 5p-електрони метастабільного атома стронцію, так і більш глибокі 5s-електрони.

Крім того, одним із механізмів може бути утворення високозбуджених короткоживучих станів негативного іона, при розпаді яких відбувається додаткове заселення рівнів атома стронцію, що ми і спостерігаємо на перерізах збудження у вигляді резонансів. Найбільш чітко резонансна структура проявляється на енергетичній залежності ефективного перерізу надпружного розсіяння електронів на метастабільних атомах стронцію, що також

пояснюється утворенням негативного іона стронцію.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. I.I. Shafranyosh, T.A. Snegurskaya, N.A. Margitich, et al, J.Phys.B. **30**, 2261 (1997)
2. М.О Маргітич, І.І. Шафраньош, Укр.фіз журн. **45**, 31 (2000)
3. І.І. Шафраньош, В.І. Марушка, Журн. фіз. досл. **4**, 415 (2000)
4. О.Б. Шпенник, В.В. Совтер, А.Н. Завилопуло, И.П. Запесочный, Е. Э. Контрош, ЖЭТФ. **69**, 4 (1975)
5. А. Стаматович, Дж. Шульц, ПНИ. **3**, 115 (1970)
6. G. Möllenstedt, Optik. **5**, 499 (1949)
7. V. Gedeon, V. Lengyel, O. Zatsarinny, C.A. Kocher, Phys. Rev. A. **56**, 3753 (1997)
8. Т.А. Снегурская, И.И. Шафраньош, Ф.И. Небесный, И.С. Алексахин, Опт. и спектр. **65**, 235 (1988)
9. И.И. Шафраньош, В.И. Марушка, Опт. и спектр. **4**, 591(2001)

## EXCITATION, IONIZATION AND SUPERELASTIC SCATTERING CROSS SECTIONS AT ELECTRON INTERACTIONS WITH METASTABLE STRONTIUM ATOMS

**T.A. Snegurskaya, M.O. Margitych, V.I. Marushka**

54 Voloshyn str., Uzhgorod National University, 88000, Uzhgorod

The processes of electron excitation, ionization and superelastic scattering have been studied as a result of electron interaction with metastable strontium atoms. The obtained absolute cross sections reach  $\sim 10^{-15}$  cm<sup>2</sup>. The specific features of each particular process are discussed.