

ОПТИЧНІ ФУНКЦІЇ ЗБУДЖЕННЯ АТОМІВ *Ca, Zn, Cd та Hg*

М.М. Ердеві, О.Б. Шпеник, В.С. Вукстич, Є.Е. Контрош

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород

У статті наведено результати вимірів оптичних функцій збудження спектральних ліній головних серій атомів *Zn, Cd* і *Hg*, що виходять з n^1S_0 рівнів, та резонансної лінії атома *Ca*. На вимірних енергетичних залежностях перерізів збудження виявлено структурні особливості. Показано, що більша частина особливостей до порогу однократної іонізації атомів зумовлена розпадом короткоживучих станів їх негативних іонів. Вище відповідних порогів іонізації на оптичних функціях головних серій збудження виявлено ефект взаємодії ежектованого і розсіяного електронів.

ВСТУП

Дослідженням елементарних процесів зіткнень повільних електронів з атомами 2-ї групи фізики приділяють увагу протягом останніх 50 років. Це пов'язано з цікавими особливостями процесів взаємодії цих атомів з електронами, а також нескладними умовами проведення експериментів. Це і відносна простота оптичного спектру, його діапазон (видима і ультрафіолетова область) та невисокі температури (30-500 С°) для отримання необхідного тиску парів робочої речовини. Необхідно також відмітити інтерес до вивчення резонансів при зіткненнях повільних моноенергетичних електронів з атомами, що пов'язано зі швидким розвитком нового напрямку фізики електрон-атомних зіткнень – спектроскопії негативних іонів.

Не вдаючись до глибокого аналізу експериментальних досліджень з вказаної тематики, вкажемо на її фундаментальний розвиток на кафедрі квантової електроніки фізфаку Ужгородського національного університету в 60-80-их роках минулого сторіччя. Так, у роботі І.П. Записочного і В.С. Шевери [1] вивчалось збудження двох спектральних ліній атома *Cd* електронним пучком з моноенергетичністю

0,6 еВ. Але помітних особливостей на оптичних функціях збудження (ОФЗ) не було виявлено. Згодом досліджувалися ОФЗ спектральних ліній атома *Cd* і *Zn* у видимій і ультрафіолетовій областях спектра [2]. На ОФЗ поблизу порога збудження було виявлено резонансні особливості, які автори пов'язують з утворенням і розпадом короткоживучих станів негативного іона. Пізніше були виміряні ОФЗ багатьох спектральних ліній атома *Cd* з розкидом енергії електронів ~0.6 еВ [3]. Цінністю цієї роботи є наявність у ній абсолютних перерізів для великої кількості спектральних ліній. І.П. Записочним та О.Б. Шпеником [4] досліджено збудження атома ртуті електронами з покращеною моноенергетичністю ($\Delta E_{1/2} = 80 \div 120$ меВ). Тут вперше виявлено резонансний характер збудження енергетичних рівнів поблизу порога збудження, детально досліджено резонансну структуру функцій збудження, яка зумовлена утворенням та розпадом короткоживучих станів негативних іонів, частина яких була ідентифікована в більш пізній роботі [5]. Пізніше І.П. Записочним та О.Б. Шпеником [6, 7] досліджувалися процеси збудження атомів *Zn, Cd, Hg* при моноенергетичності електронів у пучку рівній (60÷120)меВ. У робо-

ті цих авторів [8] вивчалися резонанси і антирезонанси на повних перерізах електронного збудження рівнів кадмію. У роботі [9] представлено результати досліджень збудження атома кальцію електронним ударом.

Як бачимо, вивченню процесів взаємодії повільних електронів з атомами II групи підгрупи *Hg* на кафедрі квантової електроніки УжНУ приділялася достатня увага. Та всі ці дослідження з об'єктивних причин проводилися при досить низькій моноенергетичності електронів (0.2-1.6 еВ) у збуджуючому пучку. Протягом останніх років суттєво вдосконалено техніку експерименту з дослідження процесів збудження атомів електронним ударом, розроблено нові способи монохроматизації електронних пучків, на базі персональних комп'ютерів впроваджено в техніку експерименту системи стабілізації параметрів і контролю умов експерименту, автоматизацію його проведення. В зв'язку з цим ми поставили за мету більш повно і прецизійно (з малим кроком по енергії) дослідити ОФЗ спектральних ліній атомів вказаних елементів від порогу збудження до 20 еВ при бомбардуванні їх пучком електронів високої моноенергетичності.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Виміри ОФЗ спектральних ліній атомів проводилися на сучасній експериментальній установці, автоматизованій на базі IBM PC. Моноенергетичний пучок електронів, який формувався розробленим нами гіпоциклоїдальним електронним монохроматором (ГЕМ) [10], прискорений до необхідної енергії, проходить через комірку зіткнень, наповнену парою досліджуваного елементу. Випромінювання збуджених атомів (в області (200÷800) нм) виділяється дифракційним монохроматором і детектується фотоелектронним помножувачем. Прискорюючий потенціал, що визначає енергію електронів, задається 12-ти розрядним цифро-аналоговим перетворювачем, керованим IBM PC з викори-

станням спеціальної прикладної програми. Автоматичний режим забезпечує повний цикл вимірів, включаючи контроль і реєстрацію всіх параметрів експерименту. Тиск парів у комірці зіткнень становив $\sim 10^{-3}$ Торр, при тиску залишкових газів у високовакуумній камері $\sim 10^{-6}$ Торр.

Для визначення моноенергетичності електронів у пучку перед кожним виміром ретельно досліджувалась вольт-амперна характеристика ГЕМ у різних режимах роботи. З продиференційованої характеристики визначались розподіл електронів за енергіями та контактна різниця потенціалів. Струм електронів по необхідності встановлювався в межах 10-300 нА, розкид електронів за енергіями при цьому становив 10-80 меВ. Крок сканування енергії електронів вибирався від 5 до 30 меВ залежно від характеру структури на енергетичних залежностях та моноенергетичності електронів. Більш детально методика досліджень викладена в [11,12].

Нами за останні чотири роки прецизійно вивчено ОФЗ 12 спектральних ліній *Hg*, які виходять з n^1S_0 , n^1P_1 , n^1D_2 , n^3S_1 , n^3P_j та n^3D_j -рівнів, 14-ти – *Cd*, які виходять з n^1S_0 , 5^1P_1 , n^3S_1 , 5^3P_1 та n^3D_j -рівнів, 19-ти – *Zn*, які виходять з n^1S_0 , 4^1P_1 , n^1D_2 , n^3S_1 , 4^3P_1 , 6^3P_2 та n^3D_j -рівнів і резонансної лінії *Ca* ($4^1S_0 - 4^1P_1$). Для забезпечення необхідної точності вимірів накопичування сигналу в кожній точці енергетичної шкали через фіксовану експозицію здійснювалось до рівня, коли статистичний розкид точок не перевищував (2÷7)%.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Оскільки цей випуск «Вісника УжНУ» присвячено світлій пам'яті професора І.С. Алексахіна, тому першим ми представляємо результат вимірів ОФЗ резонансної спектральної лінії *Ca*, дослідженням якого його група займалася ще в 70-х роках.

На рис.1 наведено наші виміри ОФЗ спектральної лінії $\lambda=422.7$ нм ($4^1S_0-4^1P_1$) у порівнянні з вимірами групи І.С. Алексахіна [9], що були виконані з моноенергетичністю електронів у пучку рівною $1\div 1.2$ еВ. Характер енергетичних залежностей перерізів збудження добре

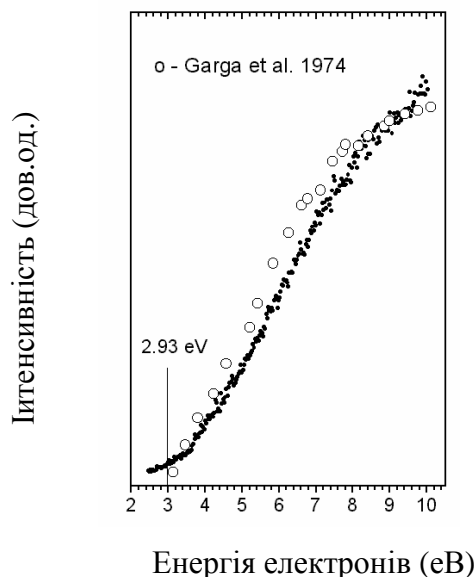


Рис.1. ОФЗ спектральної лінії 422.7 нм ($4^1S_0 - 4^1P_1$) атома Ca.

співпадає, але якщо на ОФЗ виміряній в роботі [9] можна виділити всього дві особливості в районі 6,6 та 7,8 еВ, то з наших вимірів можна виділити особливості (максимуми) при енергіях 3.79, 4.35, 4.73, 5.73, 7.47 еВ та особливість (мінімум) – при енергії 4.65 еВ. Це цілком природно, оскільки моноенергетичність електронного пучка в наших експериментах складала 60 меВ при кроці по енергії рівному 30 меВ.

Хронологічно першим ми досліджували атом ртуті. Це було продиктовано тим, що на ОФЗ спектральних ліній Hg вже раніше було виявлено цікаві резонанси, між очікували, завдяки вищій моноенергетичності електронів, виявити нові особливості на ОФЗ цих спектральних ліній. Другим аргументом на користь атома Hg є різкий припороговий резонанс на ОФЗ переходу $6s^1S_0-6p^3P_1$ $\lambda=253.7$ нм, енергетичне положення якого чітко визначено в

декількох роботах (див. [11]). Таким чином, помірявши ОФЗ цієї спектральної лінії та визначивши з точністю ± 15 меВ положення вказаного максимуму, ми отримали хороший репер для прив'язки енергетичної шкали, яким і користувались при всіх вимірюваннях.

На рисунках 2-4 наведено ОФЗ спектральних ліній, а енергетичні положення виявлених особливостей представлено в таблиці. Для кожної спектральної лінії в першому стовпчику наведено довжину хвилі (нм), у другому – поріг збудження (еВ), в третьому стовпчику – положення особливостей ОФЗ на шкалі енергій (еВ).

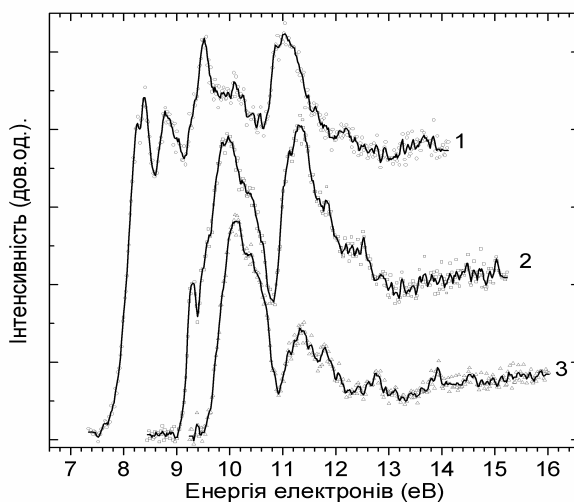


Рис.2. ОФЗ спектральних ліній ртуті: 1–407.8 нм ($6^3P_1-7^1S_0$), 2–491.6 нм ($6^1P_1-8^1S_0$), 3–410.8 нм ($6^1P_1-9^1S_0$).

На рис.2 представлено ОФЗ спектральних ліній $\lambda=407.8$ нм ($6p^3P_1-7s^1S_0$), $\lambda=491.6$ нм ($6p^1P_1-8s^1S_0$) і $\lambda=410.8$ нм ($6p^1P_1-9s^1S_0$) атома ртуті. Всі функції виміряно з кроком розгортки 20 меВ при моноенергетичності електронів у пучку 60 меВ. Положення найбільш чітко виражених максимумів визначено з точністю ± 20 меВ. Найдені нами максимуми на лінії $\lambda=491.6$ нм добре узгоджуються з положеннями максимумів, які були виявлені в роботі [5]. Краща (в 2 рази) моноенергетичність електронів пучка і значно менший крок сканування по енергії в наших вимірах дозволив більш чітко виявити структуру ОФЗ цих ліній.

З іншого боку, хороше співпадіння положення багатьох особливостей у наших вимірах з отриманими раніше свідчить про достовірність наших результатів. Кореляція положення максимумів на ОФЗ з порогоми збудження рівнів, з яких можливі каскадні переходи, вказує на те, що частина спостереженої структури може бути зумовлена каскадним заселенням досліджених вихідних рівнів. Енергетичне положення виявлених максимумів наведено в таблиці.

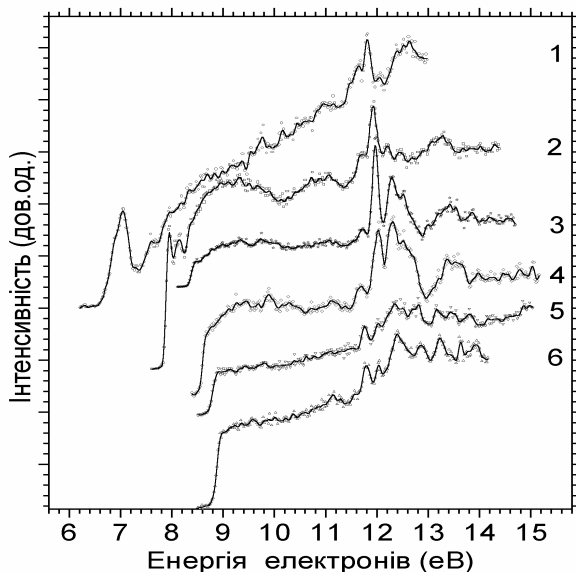


Рис.3. ОФЗ спектральних ліній кадмію: 1–441.3 нм ($5^3P_1-6^1S_0$), 2–515,5 нм, 3–430.7 нм, 4–398.2 нм, 5–381.8 нм, 6–372.4 нм ($5^1P_1-n^1S_0$, $n=6-11$).

На рис.3 представлено ОФЗ спектральних ліній атома *Cd*, що виходять з n^1S_0 рівнів ($n=6-11$). Виміри всіх залежностей проведено при однакових умовах експерименту: величина струму збуджуючих електронів становила 40 нА при моноенергетичності ~ 50 меВ. Крок сканування енергії електронів становив 20меВ. Як бачимо, ОФЗ виміряних спектральних ліній характеризуються чіткими порогоми і різким ростом перерізу збудження в припороговій області енергій. Далі спостерігається плато з незначним ростом перерізу збудження і великою кількістю малоінтенсивних особливостей в області енергій (7.8÷11.2) еВ, а в області енергій

(11.2÷15.0) еВ спостерігаються особливої з різко вираженим характером.

Звертають на себе увагу різко виражені припорогові особливості на ОФЗ спектральних ліній, що виходять з 6^1S_0 і 7^1S_0 рівнів. Такі ж особливості проявляються, але вже менш чітко, на ОФЗ спектральної лінії, що виходить з 8^1S_0 -рівня. Природу цих особливостей можна однозначно пов'язати з утворенням та розпадом короткоживучих станів негативних іонів *Cd*. Відмітимо, що вказані особливості в тій чи іншій мірі спостерігалися і в роботі [2]. Іншу частину особливостей на ОФЗ при енергіях від порога збудження до потенціалу іонізації (8.99 еВ) можна віднести на рахунок прояву вищерозташованих резонансів.

Різко виражені особливості на ОФЗ в області енергій (11.2÷15.0) еВ свідчать про значну роль у заселенні вихідних рівнів резонансів – утворення і розпаду короткоживучих станів негативного іону *Cd*, родоначальником яких є автоіонізаційні стани атома (AIC). Їх спонтанний розпад утворює збуджений атом і вільний електрон.

Окремо можна виділити область енергій (10.96÷12.41) еВ, де на всіх шести ОФЗ спостерігається структура з чотирьох різко виражених особливостей. Повна інформація про вказані особливості наведена в таблиці. Енергетичне положення чітко виражених резонансів визначено з точністю ± 15 меВ, менш чітких - ± 50 меВ. Як бачимо, з ростом головного квантового числа вихідного рівня спектральної лінії ця структура зміщується в сторону більших енергій, що підтверджує наявність ефекту взаємодії після зіткнення випущеного і розсіяного електрона з наступним захопленням повільного електрона у збуджений стан атома. Так чітко вказаний ефект поблизу порогу чотирьох AIC атома кадмію вперше спостерігався в нашій роботі. Більш детально результати цих вимірів оприлюднено на XXIII з'їзді зі спектроскопії [13].

На рис.4 наведено ОФЗ спектральних ліній атома цинку, які виходять з n^1S_0 рівнів ($n=6-10$). Енергетичні залежності

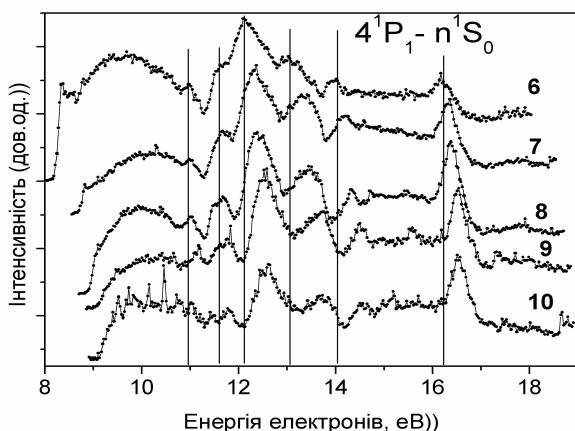


Рис.4. ОФЗ спектральних ліній цинку: 6–518.2 нм, 7–429.8 нм, 8–396.5 нм, 9–378.1 нм, 10–370.0 нм

перерізів збудження вимірювалися з кроком 30 меВ при моноенергетичності електронів у пучку (40÷55) меВ. Всі функції збудження, як і у випадку атома *Cd*, характеризуються чіткими порогами збудження і різким ростом перерізу збудження в припороговій області енергій. Далі ділянка незначного росту перерізу збудження з наступним зменшенням в області енергій (9.7÷11.2) еВ. Звертають на себе увагу різко виражені особливості резонансного характеру на ОФЗ спектральної лінії $\lambda=518.2$ нм при енергіях 10.99, 11.64, 12.14, 13.02, 14.05 та 16.23 еВ. Їх положення визначено з точністю ± 15 меВ. Вказані особливості проявляються і на ОФЗ спектральних ліній наступних членів серії. Їх енергетичне положення наведено в таблиці. Як і у випадку атома *Cd* це є свідченням значної ролі в заселенні вихідних n^1S_0 –рівнів резонансів – утворення і розпаду короткоживучих станів негативного іона цинку, родоначальниками яких є АІС атома. Помітний зсув положення цих особливостей на ОФЗ в сторону більших енергій з ростом головного квантового числа вихідного рівня знову ж таки свідчить про наявність ефекту взаємодії після

зіткнення випущеного і розсіяного електрона з наступним захопленням повільного електрона в збуджений стан атома. Цей ефект поблизу порогу шести АІС атома цинку вперше вдалося спостерігати в наших вимірах.

ВИСНОВКИ

Таким чином, використовуючи високу моноенергетичність збуджуючого електронного пучка (10÷80 меВ) було проведено прецизійні виміри ОФЗ спектральних ліній атомів *Ca*, *Zn*, *Cd* та *Hg* від порогу збудження до 19 еВ з кроком по енергії (5÷30) меВ. На вимірних ОФЗ спектральних ліній виявлено велику кількість особливостей, в тому числі резонансного характеру, а також ефект взаємодії після зіткнення випущеного і розсіяного електронів з наступним захопленням повільного електрона у збуджений стан атома. Цей ефект поблизу чотирьох порогів АІС атома кадмію та шести порогів АІС атома цинку вперше виявлено в наших роботах.

Аналіз отриманих результатів дозволив глибше розкрити механізми заселення досліджених вихідних рівнів і виділити основні процеси: прямий перехід електрона з основного стану на вихідний рівень, заселення вихідних рівнів шляхом розпаду короткоживучих станів негативного іона, заселення вихідних рівнів за рахунок каскадних переходів та за рахунок взаємодії після зіткнення випущеного та розсіяного електронів. При цьому, якщо в атомі ртуті значну роль в заселенні вихідних рівнів спектральних ліній відіграють каскадні переходи, то в атомі кадмію цей механізм практично відсутній. Натомість значну роль відіграє ефект взаємодії після зіткнення. Ще більшу роль цей ефект відіграє у випадку атома цинку, але тут вже є наявним і каскадне заселення вихідних рівнів спектральних ліній.

Ці дослідження виконано за часткової фінансової підтримки Гранту CRDF №UKC2-2832-UZ-06

Таблиця. Положення особливостей на ОФЗ спектральних ліній атомів Zn, Cd, Hg.

ЦИНК		
λ, нм	Епор, еВ	Енергетичне положення особливостей, еВ
518.2	8.187	10.99, 11.64, 12.14, 13.02, 14.05, 16.23
429.8	8.670	11.01, 11.66, 12.33, 13.26, 14.16, 16.34
396.5	8.906	11.05, 11.70, 12.43, 13.49, 14.36, 16.42
378.1	9.058	11.22, 11.82, 12.57, 13.78, 14.54, 16.62
370.0	9.160	11.27, 11.86, 12.70, 13.82, 14.60, 16.64
КАДМІЙ		
λ, нм	Епор, еВ	Енергетичне положення особливостей, еВ
441.3	6.608	10.94, 11.64, 11.81, 12.04
515.5	7.819	11.07, 11.69, 11.93, 12.20
430.7	8.293	11.08, 11.71, 11.97, 12.29
398.2	8.527	11.11, 11.72, 12.02, 12.31
381.8	8.661	11.12, 11.76, 12.03, 12.34
372.4	8.744	11.16, 11.79, 12.04, 12.40
РТУТЬ		
λ, нм	Епор, еВ	Енергетичне положення особливостей, еВ
407.8	7.920	8.26, 8.38, 8.77, 9.50, 10.06, 10.85, 11.02, 11.60, 12.20
491.6	9.22	9.31, 9.86, 9.97, 10.36, 11.13, 11.29, 11.82, 12.53
410.8	9.72	10.12, 10.38, 11.34, 11.80, 12.78, 13.92, 14.56

ЛІТЕРАТУРА

1. И.П. Запесочный, В.С. Шевера, УФЖ **5**, 350 (1960)
2. О.Б. Шпеник, И.П. Запесочный, В.В. Совтер и др., ЖЭТФ **65**, №11, 1797 (1973).
3. В.В. Совтер, И.П. Запесочный, О.Б. Шпеник, Опт. и спектр. **36**, №5, 826 (1974)
4. И.П. Запесочный, О.Б. Шпеник, ДАН СССР **160**, № 5, 1053 (1965)
5. О.Б. Шпеник, В.В. Совтер, А.Н. Завилопуло, И.П. Запесочный, Е.Э. Контрош, ЖЭТФ **69**, В.1 (7), 48 (1975)
6. И.П. Запесочный, О.Б. Шпеник, ЖЭТФ **50**, 890 (1966)
7. О.Б. Шпеник и И.П. Запесочный, Опт. и спектр. **23**, Вып.1, 15 (1967)
8. И.П. Запесочный, В.В. Совтер, О.Б. Шпеник и др., ДАН СССР **214**, №6, 1288 (1974)
9. И.И. Гарга, И.С. Алексахин, В.П. Стародуб и др., Опт. и спектр. **37**, №5, 843 (1974)
10. О.Б. Шпеник, Н.М. Эрдевди, Н.М. Романюк и др., ПТЭ №1, 109 (1998)
11. Н.М. Эрдевди, О.Б. Шпеник, В.С. Вукстич, Опт. и спектр. **95**, №4, 571 (2003)
12. Н.М. Эрдевди, О.Б. Шпеник, В.С. Вукстич, Опт. и спектр. **97**, №4, 559 (2004)
13. Н.М. Эрдевди, О.Б. Шпеник, Е.Э. Контрош, XXIII съезд по спектроскопии, 17-21 октября 2005 года. Звенигород, Московская обл. Тезисы докладов, С. 145

THE OPTICAL EXCITATION FUNCTIONS Of *Ca*, *Zn*, *Cd* and *Hg* ATOMS

N.M.Erdevdy, O.B.Shpenik, V.S.Vukstich, J.E.Kontrosh

Institute of Electron Physics, Ukrainian National Academy of Sciences
21 Universitets'ka Str., Uzhgorod 88017, Ukraine;

We have studied the optical excitation functions for spectral lines of *Zn*, *Cd* and *Hg* atoms major series, emerging from $n \ ^1S_0$ -levels. The *Ca* atom resonant line excitation functions was studied too. In the all energy dependences of measured cross sections a few features were revealed. The most of the features below the atomic ionization threshold are due to the decay of short-lived states of the negative ions. Above the corresponding atomic ionization potential the post-collision interaction effect of scattered and ejected electrons was found.