

# ПРО ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ АТОМІВ КАДМІЮ ІЗ МЕТАСТАБІЛЬНИХ СТАНІВ

**Р.О. Федорко, Т.А. Снігурська, М.О. Маргітич, І.І. Шафраньош**

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

Вперше оптичним методом отримані абсолютні величини перерізів збудження атомів кадмію із метастабільних станів електронами та їх енергетичні залежності. Величини перерізів сягають величин  $\sim 10^{-16}$  см<sup>2</sup> (при 30 еВ).

## Вступ

В даному повідомленні вперше приводяться результати експериментальних досліджень по збудженню атомів кадмію із триплетних метастабільних станів електронами.

Такі дані необхідні для різних галузей науки і техніки, які використовують плазмові середовища. Достеменно відомо, що метастабільні атоми (через їх велику кількість) відіграють значну роль у великому розмаїтті процесів, що мають місце у низькотемпературній плазмі, поперше, вони є проміжковою ланкою як на іонізаційній, так і на рекомбінаційній стадіях стаціонарних та імпульсних газових розрядів, а по-друге, метастабільні стани є внутрішньоатомними резервуарами енергії, що також дуже важливо для перебігу різних реакцій.

Атом кадмію зі складною електронною конфігурацією  $4d^{10}5s^2$  є привабливим об'єктом для фундаментальних досліджень широкого кола процесів взаємодій: пружного та надпружного розсіяння електронів, збудження та іонізації і т.д. Тим не менше, на даний час виконано обмежену кількість як експериментальних, так і теоретичних досліджень в цьому напрямку [1–6]. В основному вони присвячені дослідженням процесів збудження із основного стану атома кадмію. Дотепер практично відсутні в літературі відомості про прямі експериментальні дослідження перерізів збуд-

ження атомів кадмію із метастабільних станів електронами.

Мала кількість експериментальних робіт не дає відповіді на багато запитань, не стимулює створення нових теоретичних моделей, оскільки достовірність їх буває досить важко перевірити. Крім того, часто невизначеним залишається сам механізм взаємодії електронів із збудженими атомами. Така ситуація свідчить про те, що нові експериментальні дослідження є актуальними.

## Техніка і методика досліджень

Експерименти проводились оптичним методом з використанням техніки пучків метастабільних атомів кадмію і електронів, що перетинаються.

У роботі використовувався розрядний спосіб одержання пучка метастабільних атомів кадмію, реалізація якого проходила у дві стадії. Детально експериментальна установка і методика досліджень описана в роботах [7, 8]. На першій стадії за допомогою термічного ефузійного джерела і системи колімуючих щілин створювався інтенсивний пучок атомів в основному стані. На другій стадії пучок атомів в основному стані конвертувався в пучок збуджених атомів за допомогою розрядного способу. Конвертор представляв собою камеру, у якій створені умови для стабільного електричного розряду. Ступінь конвертування досягала  $\sim 10\%$ , кут розбіжності пучка атомів –  $5^\circ$ – $7^\circ$ . Відстань

між розрядною камерою й областю зіткнень підбиралася такою чином, щоб атоми в короткоживучих збуджених станах, пролітаючи її, встигали радіаційно розпадатися, і в області взаємодії з електронами пучок складався тільки з атомів в основному й довгоживучих метастабільних станах. Концентрація метастабільних атомів визначалася абсорбційним способом за допомогою методу одного дзеркала. Окремо зазначимо, що отримання пучка атомів кадмію внаслідок специфічних фізичних особи-востей цього елемента є складним завданням.

В якості джерела електронного пучка використовувалася п'ятиелектродна електронна гармата, що складалася з катодного блоку й електронно-оптичної системи формування пучка. Емітером електронів служила нитка з торованого вольфраму. Електрони, що пройшли область зіткнень, попадали в приймач, що складався з охоронного електрода й довгого (40 мм) циліндра Фарадея. Дана гармата дозволяла одержувати пучки електронів силою струму  $\sim 20$  мкА і енергетичною неоднорідністю  $\sim 0.5$  еВ (повна ширина на напіввисоті функції розподілу).

Калібрування енергетичної шкали електронів здійснювалось за порогами збудження атомних ліній з основних станів з точністю  $\sim 0,2$  еВ. Система реєстрації працювала у режимі рахунку окремих фотоімпульсів з використанням техніки модуляції електронного пучка. В якості оптичного приладу використовувався МДР-23.

### Результати досліджень та їх обговорення

Розглянемо коротко оптичні властивості кадмію. Основний стан атома має вигляд  $4d^{10}5s^2$ , і йому відповідає терм  $5^1S_0$  (див. рис. 1.). Спектр характеризується наявністю одиночних (синглетних) і триплетних серій. Найбільш глибокими збудженими є метастабільні стани  $5s5p^3P_{0,2}$ , (енергії 3,73 еВ і 3,94 еВ, відповідно). Триплетна структура широка і легко розділяється за

допомогою спектральних приладів (наприклад,  $5s5p^3P_{1,2,3} - 5s6s^3S_1$ :  $\lambda$  508,6 нм;  $\lambda$  480,6 нм;  $\lambda$  467,8 нм). У спектрі кадмію спостерігаються інтеркомбінаційні переходи між одиночними і триплетними рівнями. При одночасному збудженні двох електронів виникають так звані „зміщені” рівні. Потенціал іонізації атома кадмію рівний 8,992 еВ.

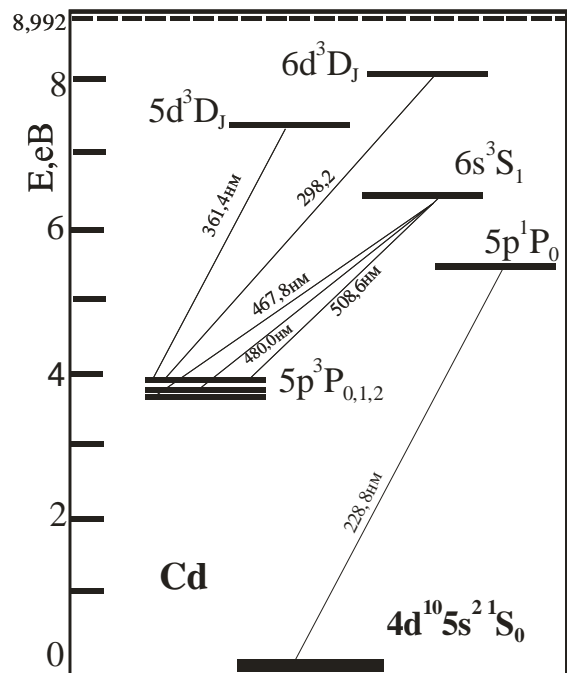


Рис. 1. Спрощена діаграма рівнів атома кадмію та досліджених спектральних переходів.

У результаті експериментальних досліджень були визначені абсолютні перерізи збудження  $Q^m$  найбільш інтенсивних спектральних переходів (СП) Cd для енергії електронів 30 еВ, а також їх енергетичні залежності. Вивчені спектральні переходи атома кадмію показані на рис. 1, а дані по абсолютним величинам ефективних перерізів збудження при 30 еВ ( $Q_{30}^m$ ) приведені в таблиці 1. Там також представлена спектроскопічна ідентифікація переходів, вказані їх довжини хвиль  $\lambda$ , експериментальні пороги збудження  $E_{збудж.}$ , і співвідношення перерізів збудження з метастабільних  $Q_{30}^m$  і основного станів  $Q_{30}^o$  при енергії 30 еВ ( $Q_{30}^m/Q_{30}^o$ ) для конкретного переходу.

Абсолютні величини перерізів отримані нами в результаті нормування на перерізи збудження СП із основного стану  $Q^o$  атому Cd, виміряних у роботах [1, 2]. Формула для визначення перерізів має вигляд:

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

де  $I^m/I^o$  – відносні інтенсивності спектральної лінії, збудженої із метастабільного і основного станів (безпосередньо визначалися нами в експерименті);  $N^o/N^m$  – відношення концентрацій атомів в основному і метастабільних станах (концентрація атомів у метастабільних станах складала  $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , а концентрація атомів у основному стані  $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ).

Похибка визначення абсолютних величин перерізів збудження спектральних ліній складала  $\sim 60\%$ , а відносна похибка визначення їх енергетичних залежностей –  $\sim 8\%$ .

З таблиці видно, що найбільшим перерізом характеризується перехід  $5^3P_2 - 6^3S_1$ , його величина сягає  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$ . Окремо відмітимо, що відношення перерізів збудження спектральних переходів з рівня  $6^3S_1$  на нижні  $5^3P_j$  рівні відповідає відношенню інтенсивностей складових триплету, яке згідно [9], складає 5:3:1 (в межах помилки). Для всіх вивчених переходів спостерігається суттєве значення відношень  $Q_{30}^m/Q_{30}^o$ , яке говорить про значну ефективність їх збудження із метастабільних станів – майже на два порядки перевищує ефективність збудження з основних станів.

Таблиця 1

**Перерізи збудження спектральних переходів атома кадмію з метастабільних станів електронами**

№ п/п	ПЕРЕХІД	$\lambda$ , нм	$E$ збудж., еВ	$Q_{30}^m$ , $10^{-17}, \text{см}^2$	$Q_{30}^m/Q_{30}^o$
1	$5^3P_2 - 6^3S_1$	508,6	2,4	11	90
2	$5^3P_1 - 6^3S_1$	480,0	2,4	7	85
3	$5^3P_0 - 6^3S_1$	467,8	2,4	1,5	55
4	$5^3P_2 - 5^3D_{1,2,3}$	361,4	3,4	4,5	70
5	$5^3P_2 - 6^3D_{1,2,3}$	298,2	4,2	2,3	110

На рис. 2 – 4 представлені енергетичні залежності перерізів збудження спектральних переходів – функції збудження (ФЗ СП): ( $5^3P_2 - 6^3D_j$ ,  $\lambda 298,2 \text{ нм}$ ); ( $5^3P_2 - 5^3D_j$ ,  $\lambda 361,4 \text{ нм}$ ); ( $5^3P_1 - 6^3S_1$ ,  $\lambda 480,0 \text{ нм}$ ). Аналіз кривих свідчить про наявність різких максимумів біля порогів збудження при енергіях  $\sim 9,0 \text{ еВ}$ ,  $\sim 8,5 \text{ еВ}$  і  $\sim 7,5 \text{ еВ}$  відповідно (по ширині їх можна співставити з моноенергетичністю електронного пучка) і наступний дуже швидкий спад перерізу (ширина на піввисоті цих максимумів складає  $\sim 1,2 \text{ еВ}$ ). Таким чином, ці максимуми мають ознаки резонансів, які, на наш погляд, пов'язані з утворенням і розпадом збуджених станів негативного іону.

В роботах [4, 5] приводяться енергії, ширини і, в деяких випадках, класифікація

резонансів (станів негативного іону), які спостерігалися при взаємодії електронів з атомами кадмію. Так, згідно цих робіт, при енергіях 7,38; 8,37; 9,38 еВ мають місце резонанси (класифікація їх не наведена). Можливо, ці стани негативного іона розпадаючись, роблять резонансний внесок в переріз збудження спектрального переходу. Подібна картина спостерігалась нами і при збудженні із метастабільних станів атомів лужноземельних елементів електронами (наприклад, [10]) і структуру, виявлену на енергетичних залежностях збудження, ми ідентифікували з утворенням і розпадом збуджених станів негативних іонів.

На кривих, які представлені на рис. 2–4, спостерігаються і інші, менш виражені, особливості у вигляді максимумів і

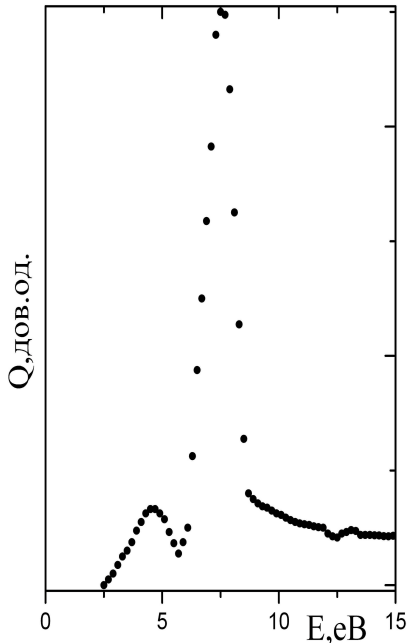


Рис. 2. ФЗ СП  $5^3P_1 - 6^3S_1$ , ( $\lambda 480,0$  нм).

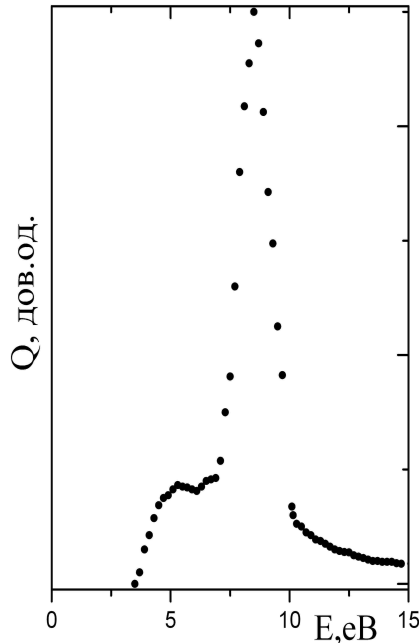


Рис. 3. ФЗ СП  $5^3P_2 - 5^3D_1$ , ( $\lambda 361,4$  нм).

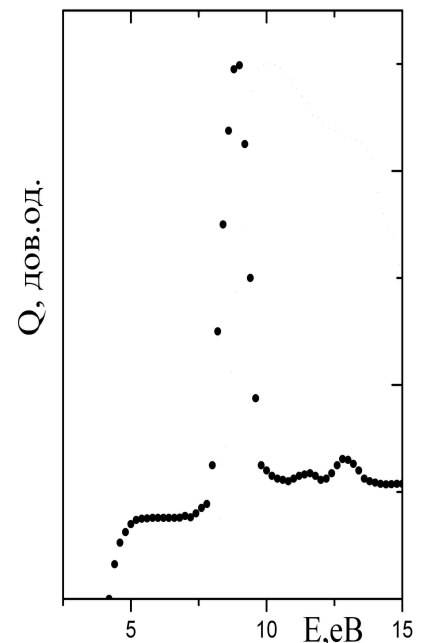


Рис. 4. ФЗ СП  $5^3P_2 - 6^3D_1$ , ( $\lambda 298,2$  нм).

мінімумів, природу яких на даний час важко з'ясувати.

На рис. 5 наведено порівняння енергетичних залежностей перерізів електронного збудження спектрального переходу ( $5^3P_2 - 6^3D_1$ ,  $\lambda 298,2$  нм) із метастабільних (крива 1) і основного (крива 2) станів атома. Хід ФЗ з основного стану відмінний від ходу ФЗ з метастабільних станів, основний максимум знаходиться близько до порогу збудження при енергії  $\sim 10$  еВ (поріг збудження з основного стану  $8,1$  еВ), а далі достатньо швидкий монотонний спад.

Зауважимо, що така поведінка ФЗ з метастабільних станів (крива 1) в порівнянні з ФЗ з основних станів (крива 2) не вкладається в раніше представлену нами картину взаємодії електронів з метастабільними атомами лужноземельних елементів (конфігурації метастабільних станів  $nsnp^3P_{0,2}$  у цих елементів ідентичні), наприклад, атомів кальцію, стронцію [7, 8]. В цих роботах було показано, що поведінка ФЗ з метастабільних станів переходів  $n^3P_2 - (n+1)^3D_1$  схожа на хід ФЗ резонансних переходів цих елементів з основного стану, які відбуваються переважно при дипольній взаємодії без зміни спінового стану атомної системи, енергетична залежність перерізу має мати

пологий вигляд з максимумом у декілька порогових одиниць.

Якщо припустити, що різкий максимум при  $\sim 9$  еВ представляє собою резонанс в перерізі збудження з метастабільних станів (про що йшлося вище) і провести уявну лінію ходу перерізу (штрихова лінія на рис. 5) без цього резонансу, то ми побачимо, що енергетична залежність перерізу буде мати пологий вигляд, а максимум буде знаходитись при енергії  $\sim 20$  еВ, що відповідає кільком пороговим одиницям.

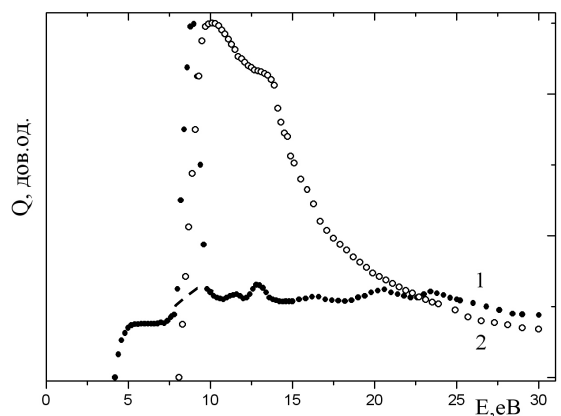


Рис. 5. ФЗ спектрального переходу  $5^3P_2 - 6^3D_1$ , ( $\lambda 298,2$  нм) із метастабільних (крива 1) і основного (крива 2) станів атома.

Це повністю вкладається у фізичну картину, яка спостерігалась для лужнозе-

мельних атомів [7, 8]. Збудження цього ж рівня з основного стану відбувається зі зміною спінового стану системи (основний стан атома кадмію синглетний і йому відповідає терм  $5s^2 \ ^1S_0$ ), тому і характеризується зовсім іншою формою кривої – максимум знаходиться безпосередньо біля порогу збудження, після чого спостерігається швидкий спад (порівняємо криві 1 і 2 на рис. 5).

Цікаво відмітити, що при енергії  $\sim 12,5 - 13$  еВ на ФЗ з основного стану (крива 2) виникають при збудженні електрона із внутрішньої  $4d^{10}$  оболонки.

Ми віддаємо належне логічності цієї інтерпретації, однак вважаємо можливою і альтернативну версію походження цих особливостей. Так при  $E \sim 9$  еВ на ФЗ з

метастабільних станів (крива 1) має місце чіткий резонанс (про що говорилося вище). З урахуванням порогів збудження з основного і метастабільного станів (енергія метастабільного стану  $\sim 3,9$  еВ) відслідковується однозначна кореляція між цими двома максимумами на кривих 1 і 2. Таким чином, ці особливості можуть утворюватися і в результаті розпаду негативного іона і проявляються в перерізах збудження як з метастабільного, так і з основного стану атома кадмію електронами.

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень вперше отримані нові дані про процеси збудження спектральних переходів атомів кадмію із метастабільних станів електронним ударом.

## Література

1. Совтер В.В., Запесочный И.П., Шпенник О.Б. Эффективные сечения и особенности электронного возбуждения атома кадмия // Опт. и спектр. – 1974. – Т.36, №5. – С. 826–834.
2. Запесочный И.П., Шевера В.С. О тонкой структуре функций возбуждения некоторых линий кадмия // Докл. АН СССР. – 1961. – Т.141, №3. – С. 595–598.
3. Kontros J.E., Szofter L.S., Chernyshova I.V., Spenik O.B. Cross section of the electron scattering by slow cadmium atoms. // J.Phys.B. – 2002. – V.35, №17. – P. 2195–2203.
4. Bucman S.J., Clark C.W. Atomic negative-ion resonances // Rev. Mod. Phys. – 1994. – V.66, №2. – P. 539–665.
5. Sullivan J.P., Burrow P.D., Newman D.S. et al. An experimental and theoretical study of transient negative ions in Mg, Zn, Cd and Hg // New Journal of Physics. – 2003. – v. 5. – P. 159.1 – 159.25.
6. Deutsch H., Becker K., Matt S., Mark T.D. Calculated cross section for the electron-impact ionization of metastable atoms // J.Phys.B. – 1999 V.32. – P. 4249–4259.
7. Shafranyosh I.I., Snegyrskaya T.A., Margitich N.A., Bogacheva S.P., Lengyel V.I., Zatsarinny O.I. Excitation of the Ca atom from the metastable states by electron impact // J.Phys.B: At. Mol. Opt. Phys. – 1997. – V.30. – P. 2261–2285.
8. Шафраньош И.И., Снегурская Т.А., Алексахин И.С. Эффективные сечения возбуждения атомов магния из метастабильных состояний электронным ударом // Оптика и спектр. – 1994. – Т.76, №1. – С. 23–25.
9. Фриш С.Э. Оптические спектры атомов – М. Изд. Физ. Мат. лит. – 1963. – 640 с.
10. Снегурская Т.А., Шафраньош И.И., Небесный Ф.И., Алексахин И.С. Резонансные явления при возбуждении атомов стронция из  $5\ ^3P_{0,2}$ -состояний электронами // Опт и спектр.-1988, т.65, вып. I. – С. 235–236.

## **ON ELECTRON EXCITATION OF CADMIUM ATOMS FROM THE METASTABLE STATES**

**R.O. Fedorko, T.A. Snegurskaya, M.O. Margitych,  
I.I. Shafranyosh**

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin, 54

The absolute values of electron excitation cross sections for cadmium atoms from the metastable states and their energy dependences have been obtained for the first time by using an optical method. The above values reach  $\sim 10^{-16} \text{ cm}^2$  (at 30 eV).

## **О ВОЗБУЖДЕНИИ АТОМОВ КАДМИЯ ИЗ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНАМИ**

**Р.О. Федорко, Т.А. Снегурская, М.О. Маргитич,  
И.И. Шафраньш**

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. А.Волошина, 54

Впервые оптическим методом получены абсолютные величины сечений возбуждения атомов кадмия из метастабильных состояний электронами и их энергетические зависимости. Значения сечений достигают величин  $\sim 10^{-16} \text{ см}^2$  (при 30 эВ).