

УДК 539.184/186
 PACS 34.80.Dp
 DOI 10.24144/2415-8038.2020.47.74-81

В.О. Боровик¹, І.І. Шафраньош¹, О.О. Боровик^{1,2}

¹Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54, Україна,
 e-mail: vladimir.borovik@uzhnu.edu.ua

²Інститут електронної фізики НАН України, 88017, Ужгород, вул. Університетська, 21, Україна

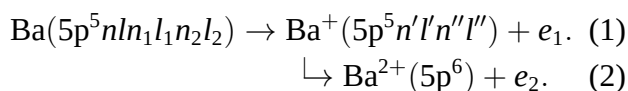
ДВОСТУПЕНЕВА АВТОІОНІЗАЦІЯ АТОМІВ СТРОНЦІЮ ТА БАРІЮ ПРИ ЗБУДЖЕННІ ЕЛЕКТРОННИМ УДАРІМ

Шляхом порівняльного аналізу експериментальних спектрів ежектованих електронів і фотозбудження з теоретичними даними з перерізів збудження та ймовірностей розпаду автоіонізаційних станів в атомах стронцію та барію показано, що основними процесами утворення іонів Sr^{2+} і Ba^{2+} при електрон-атомних зіткненнях є двоступеневий та двоелектронний розпад високоенергетичних атомних автоіонізаційних станів $p^5nl_1l_1n_2l_2$.
Ключові слова: електрон, атом, оболонка, стан, іонізація, автоіонізація.

Вступ

Відомо, що наявність у лужноземельних атомів замкнутої валентної оболонки робить процеси їх електронного збудження та іонізації більш складними, ніж у інших атомів, зокрема ніж у подібних за структурою внутрішніх електронних оболонок атомів лужних металів. Це також стосується і впливу автоіонізаційних процесів на перебіг електронної іонізації лужноземельних атомів. Вже перші дослідження одно- і двократної іонізації виявили швидке зростання перерізів зразу за порогом збудження зовнішньої np^6 оболонки атомів Ca ($n = 3$), Sr ($n = 4$) і Ba ($n = 5$) [1–4]. Резонансний характер енергетичної поведінки перерізу однократної іонізації, його різкий спад при енергіях 5–6 еВ вище порогу збудження np^6 оболонки і водночас різкий підйом перерізу двократної іонізації при цих енергіях вказували на існування додаткових каналів електронного розпаду для високоенергетичних атомних автоіонізаційних станів $np^5nl_1l_1n_2l_2$. Теоретичний аналіз перерізу збудження $5p^6$ оболонки в іоні барію [5] і порівняння його іонізаційного перерізу з перерізом фотоіоніза-

ції [6, 7] показали, що вказані аномалії можуть бути пов'язані з двоступеневим характером електронного розпаду атомних автоіонізаційних станів, а саме



Прецизійні дослідження енергетичних спектрів ежектованих електронів e_1 і e_2 дозволили підтвердити наявність каналів розпаду (1), (2) лише для окремих атомних автоіонізаційних станів в атомах барію [8]. Для атомів стронцію прямі дослідження цих процесів не проводилися.

Нещодавно виконані в нашій лабораторії систематичні дослідження динаміки електронного збудження спектрів ежектованих електронів, що утворюються при розпаді автоіонізаційних станів $p^5nl_1l_1n_2l_2$ в атомах стронцію [9] та барію [10], а також проведені в цих роботах теоретичні розрахунки параметрів цих станів дозволили встановити для них як процеси утворення, так і канали розпаду. Наступні дослідження перерізів автоіонізації стронцію [11] та барію [12] дозволили встановити основні електронні конфі-

гурації, які визначають абсолютне значення та енергетичну поведінку автоіонізаційного внеску в переріз електронної іонізації.

В даній роботі були виміряні електронні спектри, що відповідають розпаду атомних автоіонізаційних станів $p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ атомів стронцію та барію. Шляхом порівняльного аналізу цих даних зі спектрами фотозбудження і залученням результатів теоретичних розрахунків показано, що основними процесами утворення іонів Sr^{2+} і Ba^{2+} при електронній іонізації атомів стронцію та барію є двоступеневий та двохелектронний розпад високоенергетичних атомних станів $p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$.

Апаратура і методика вимірів

Виміри спектрів, що утворюються при електронному розпаді автоіонізаційних станів атомів стронцію і барію було проведено на електронному спектрометрі, докладно описаному раніше [13, 14]. Зокрема, для енергетичного аналізу розсіяних і автоіонізаційних електронів застосовувався 127° -ний електростатичний циліндричний дефлектор з енергетичною і кутовою роздільною здатністю не гірше 0.07 eV і 3° відповідно. Джерелом первинного електронного пучка слугувала п'яти електродна гармата з довгофокусною трьох лінзовою електронно-оптичною системою. Моноенергетичність електронного пучка становила не гірше 0.4 eV і оцінювалася за шириною піка пружного розсіювання в спектрах втрат розсіяних електронів. Джерело пучка нейтральних атомів з резистивним нагрівом забезпечувало густину парів в зоні зіткнень на рівні 10^{12} ат·см $^{-3}$. Похибки енергетичних шкал первинних і автоіонізаційних електронів становили ± 0.1 eV і ± 0.05 eV відповідно.

Результати й обговорення

На рисунках 1 і 2 наведено порівняння виміряних при енергії зіткнень 100 eV електронних спектрів, що відповідають розпаду автоіонізаційних станів $p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ з утворенням одноступеневих іонів в станах p^6nl , зі спектра-

ми фотозбудження (фотопоглинання) зовнішньої p^6 оболонки атомів стронцію [15] та барію [16]. Помітно більш складна структура електронних спектрів в низькоенергетичній області (до 25 eV для стронцію і до 19 eV для барію) виявляє ефективне збудження дипольно-заборонених станів ($J \neq 1$), збудження і розпад яких можна спостерігати лише при електронно-атомних зіткненнях. Зазначимо, що саме завдяки цій властивості методу електрон-атомних зіткнень вперше були визначені енергетичні пороги збудження зовнішніх p^6 оболонок в атомах стронцію [9] та барію [10].

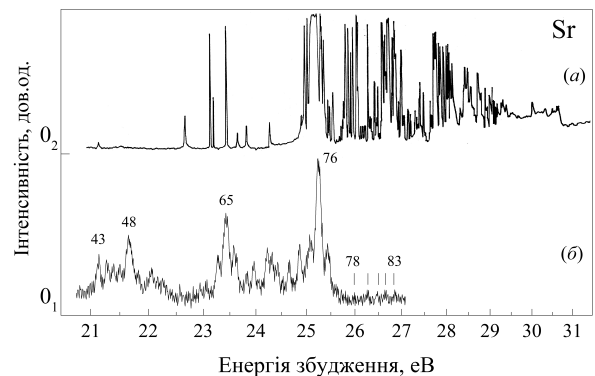


Рис. 1: Спектри фотозбудження [15] (а) та електронного розпаду (б) автоіонізаційних станів $4p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ атома Sr. Нумерація ліній в електронних спектрах згідно роботи [9].

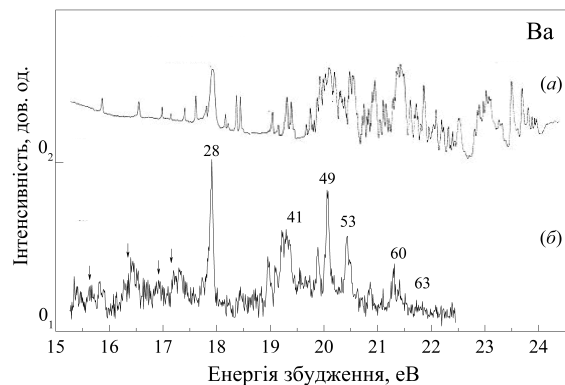


Рис. 2: Спектри фотозбудження [16] (а) та електронного розпаду (б) автоіонізаційних станів $5p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ атома Ba. Нумерація ліній в електронних спектрах згідно роботи [10].

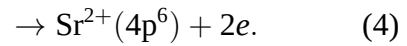
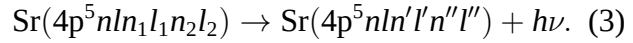
Подальше порівняння обох типів спектрів також показує, що електронні спектри

мають помітно менший енергетичний діапазон з боку високих енергій. Зокрема, лінії, що відображають електронний розпад з утворенням однозарядних іонів в станах $4p^6nl$ спостерігаються лише для автоіонізаційних станів з порогами збудження не вище 27 еВ в стронцію і 22 еВ в барію. Так станам, розпад яких в електронних спектрах відображений незначними за інтенсивністю лініями 78-83 (стронцій) і 61-63 (барій), в спектрах фотозбудження відповідають інтенсивні і широкі лінії. Теоретичні розрахунки [9, 10] добре узгоджуються з такою поведінкою спектрів фотозбудження прогнозуючи значні перерізи збудження для високоенергетичних автоіонізаційних станів. Для пояснення вказаних особливостей, розглянемо більш детально процеси збудження і розпаду автоіонізаційних станів для кожного з досліджуваних атомів.

Стронцій

Як впливає з аналізу результатів спектроскопічної класифікації автоіонізаційних станів $4p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ (див. таблицю 2 в [9] і таблицю III нижче), із 54 ідентифікованих атомних станів, що мають електронний тип розпаду, лише три стани $4d^2(^3P)(^2P)7s^3P_1$ (2277), $4d(^3P)5p(^4P)6p^5P_1$ (3178), $4d^2(^3F)(^4F)7d^5F_1$ (3325) розташовані вище порогу збудження найнижчого іонного стану $(4p^54d5s)^4P_{1/2}$ при 26,92 еВ [17]. Для 19 станів, що лежать між 25,4 та 26,9 еВ, і для 21 стану, що лежать вище 26,92 еВ, і збудження яких добре спостерігається в спектрах фотозбудження, у спектрах ежектованих електронів не виявлено жодного автоіонізаційного переходу з утворенням іону Sr^+ у станах $4p^6nl$. І це незважаючи на те, що обчислені ймовірності розпаду для них такі самі або навіть більші,

ніж для низько розташованих станів (див. таблицю 1 в [9]). Для першої групи з 19 станів енергетично дозволеними є наступні канали розпаду



Як показали розрахунки [9] (див. таблицю 1 в цій роботі), радіаційний розпад (3) має малу ймовірність для всіх вищезгаданих станів. Це підтверджується також відносно широкими профілями відповідних ліній у спектрах фотозбудження [8, 15] (див. рисунок II). Реакція (4) відображає розпад атомних автоіонізаційних станів з одночасним викидом двох електронів. І хоча вона певною мірою є екзотичною, але це єдиний можливий електронний канал розпаду для розглянутих атомних станів. Через довільний характер розподілу енергії між двома ежектованими електронами цей розпад не можна спостерігати у вимірних електронних спектрах. Однак про спостереження реакції (4) повідомлялося раніше в [18], де було виявлено появу іонів Sr^{2+} в енергетичній області широкого інтенсивного піку фотопоглинання між 24,9 і 25,5 еВ (див. рисунок III). Відсутність переходів з утворенням іонів Sr^+ у станах $4p^6nl$ для групи з 21 стану, розташованих вище 26,92 еВ, можна пояснити лише наявністю двоступеневого процесу автоіонізації [8], тобто реакціями (I), (II). Як було показано в [9], врахування процесу (I) при розрахунках значно знижує ймовірність розпаду високоенергетичних автоіонізаційних станів в іонні стани $4p^6nl$ від типових значень 0.1–0.9 практично до нуля (див. значення B в таблиці III).

| Configuration <i>LSJ</i> | E_{36} , eV | $5s_{1/2}$ | $4d_{5/2}^{3/2}$ | $5p_{3/2}^{1/2}$ | $5d_{5/2}^{3/2}$ |
|--------------------------|---------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $4d^2(^3P)(^2P)7s^3P_1$ | 27.77 | 0.07 | $\frac{0.01}{0.01}$ | $\frac{0.01}{0.03}$ | $\frac{0.00}{0.02}$ |
| $4d(^3P)5p(^4P)6p^5P_1$ | 28.26 | 0.01 | - | - | $\frac{0.02}{0.00}$ |
| $4d^2(^3F)(^4F)7d^5F_1$ | 28.53 | 0.09 | $\frac{0.07}{0.00}$ | $\frac{0.00}{0.16}$ | - |

Табл. 1: Енергії збудження E_{36} та ймовірності розпаду B найбільш високоенергетичних автоіонізаційних станів атомів стронцію на рівні $4p^6nl$ іону Sr^+ [9]

Саме наявність процесу (1) пояснює як низьку інтенсивність електронних ліній 78–83, так і повну відсутність переходів в іонні стани $4p^6nl$ для всіх 21 станів, розташованих вище 26,92 еВ. Високу ефективність процесу (1) при енергіях вище 26,92 еВ показали також дослідження фотоіонізації атома стронцію [18]. Енергії ежектованих електронів e_1 не перевищують 2 еВ і, отже, знаходяться поза енергетичним діапазоном, розглянутим в даній і всіх попередніх вимірюваннях. Однак лінії, що відображають розпад іонних автоіонізаційних станів $4p^5n'l'n''l''$, чітко спостерігаються в низькоенергетичній області 10–14 еВ [17].

Барій

Аналіз даних з спектроскопічної класифікації атомних автоіонізаційних станів

$5p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ (див. таблицю 3 в [10] показує, що найбільш ймовірними каналами розпаду для них є переходи в стани $6s_{1/2}$ та $5d_{3/2,5/2}$ іона Ba^+ . Як вже зазначалося вище у Вступі, для станів, що лежать вище порогу збудження іонних автоіонізаційних станів $5p^5nl n_1 l_1$ при 21.01 еВ [19], можливим стає процес двоступеневого розпаду (1), (2). Розрахунки [10] показують, що ймовірність процесу розпаду (1) з утворенням Ba^+ в автоіонізаційних станах $5p^55d^2$ становить приблизно $10^{12} s^{-1}$, тобто того ж порядку, що і для розпаду з утворенням іона Ba^+ у станах $5p^6nl$, але є на порядок вище для переходів у стани $5p^55d6s$. В останньому випадку коефіцієнти B для $5p^66s, 5d$ каналів розпаду зменшуються в три-п'ять разів для всіх високоенергетичних станів, що лежать вище 21 еВ (див. значення B в дужках в таблиці 2).

| Configuration <i>LSJ</i> | $E_{зб}$, eV | $6s_{1/2}$ | $5d_{3/2}$ | $5d_{5/2}$ |
|--------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $5d(^3F)(^2F)7d^1P_1$ | 21.21 | $\frac{0.43}{(0.07)}$ | $\frac{0.17}{(0.04)}$ | $\frac{0.23}{(0.08)}$ |
| $5d^2(^1S)(^2P)6s^3P_1$ | 21.31 | $\frac{0.46}{(0.35)}$ | $\frac{0.26}{(0.22)}$ | $\frac{0.15}{(0.11)}$ |
| $5d(^3D)6s(^2D)7d^3P_1$ | 21.41 | $\frac{0.30}{(0.09)}$ | $\frac{0.17}{(0.05)}$ | - |
| $5d(^3D)6s(^4D)6d^3P_1$ | 21.53 | $\frac{0.42}{(0.08)}$ | $\frac{0.07}{(0.01)}$ | 0.03 |
| $6s^27d^3D_3$ | 21.79 | $\frac{0.40}{(0.10)}$ | $\frac{0.24}{(0.06)}$ | $\frac{0.08}{(0.02)}$ |

Табл. 2: Енергії збудження E та ймовірності розпаду B найбільш високоенергетичних автоіонізаційних станів атомів барію на рівні $5p^6nl$ іону Ba^+ [10]

Саме домінування процесу (1) пояснює низьку інтенсивність ліній 61–63 та повну відсутність ліній ежектованих електронів, пов'язаних із розпадом тих атомних станів, що лежать вище 22 еВ. Між тим, висока ефективність збудження останніх, прогнозована розрахунками [10], підтверджується високою інтенсивністю ліній в спектрі фотозбудження [16] (див. рисунок 2) і в спектрі втрат енергії розсіяних електронів [20].

Висновки

На основі порівняльного аналізу вимірюваних спектрів ежектованих електронів зі спектра-

ми фотозбудження і результатами теоретичних розрахунків показано наявність двоступеневого і двоелектронного розпаду для всіх високоенергетичних атомних автоіонізаційних станів $p^5nl n_1 l_1 n_2 l_2$ в атомах стронцію та барію. Саме ці процеси зумовлюють високу ефективність утворення двозарядних іонів Sr^{2+} та Ba^{2+} при енергіях вище порогу прямої іонізації p^6 оболонки і є відповідальними за різке зростання перерізу двократною іонізації цих атомів.

Дане дослідження виконано в рамках наукової тематики проектів №0117U003239 та №0117U000651 НАН України, та проекту № 0118 U000173 МОН України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kaneko Y. Single and double ionization of Na, K and Mg by electron impact / Y. Kaneko // *J. Phys. Soc. Jap.* — 1961. — V. 16. — P. 2288 – 2293.
- [2] Okudaira S. Multiple ionization of Ca, Sr and Ba by electron impact / S. Okudaira // *J. Phys. Soc. Jap.* — 1970. — V. 29. — P. 409 – 415.
- [3] Okyno Y. Ionization cross section of Ca, Sr and Ba by electron impact // Y. Okyno // *J. Phys. Soc. Jap.* — 1971. — V. 31. — P. 1189 – 1195.
- [4] Veinshtein L. A. Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium / L.A. Veinshtein, V.I. Ochkur, V.I. Rakhovskii, A.M. Stepanov // *Sov. Phys. – JETP.* — 1972. — V. 34. — P. 271 – 275.
- [5] Hansen J.E. The structure of the autoionizing p^5ds configurations in MgII, CaII, SrII and BaII and interpretation of electron impact cross sections for these ions / J.E. Hansen // *J. Phys. B.* — 1975. — V. 8. — P. 2759 – 2770.
- [6] Hansen J.E. Interpretation of the 21.2 eV photo-electron spectrum of atomic Ba / J.E. Hansen // *J. Phys. B.* — 1975. — V. 8. — P. L403 – L406.
- [7] Connerade J.P. Two-step autoionization and the double ionization anomaly in BaI / J.P. Connerade, S.J. Rose, I.P. Grant // *J. Phys. B.* — 1979. — V. 12. — P. L53 – L55.
- [8] Hotop H. On the 584.3 Å photoelectron spectrum of Ba / H. Hotop, D. Mahr // *J. Phys. B.* — 1975. — V. 8. — P. L301-L304.
- [9] Kupliauskiene A. The energy structure and decay channels of the $4p^6$ -shell excited states in Sr / A. Kupliauskiene, G. Kerevičius, V. Borovik, I. Shafranyosh, A. Borovik // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* — 2017. — V. 50. — P. 225201 (14p).
- [10] Hrytsko V. The 5p autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines / V. Hrytsko, G. Kerevicius, A. Kupliauskiene, A. Borovik // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* — 2016. — V. 49. — P. 145201(12p).
- [11] Borovik V. Excitation-autoionization contribution to single ionization of Sr by electron impact / V. Borovik, I. Shafranyosh, O. Borovik // *Phys. Scr.* — 2020. — V. 95. — P. 065404 (7p).
- [12] Borovik V. Excitation-autoionization of the $5p^6$ subshell in Ba atoms / V. Borovik, V. Roman, A. Kupliauskienė, I. Shafranyosh, O. Borovik // *Eur. Phys. J. D.* — 2019. — V. 73; 43, (5p).
- [13] Borovik A. A. Electron impact excitation of the $(3p^54s^2)^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium / A.A. Borovik, A.N. Grum-Grzhimailo, K. Bartschat, O. Zatsarinny // *J. Phys. B.* — 2005. — V. 38. — P. 1081 – 1092.
- [14] Borovik A.A. An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors / A.A. Borovik // *Ukr. Phys. Journal.* — 2008. — V. 53. — No. 10. — P. 1021 – 1027.
- [15] Mansfield M.W.D. The SrI absorption spectrum in the vacuum ultraviolet: excitation of the 4p-subshell / M.W.D. Mansfield, G.H. Newsom // *Proc. R. Soc. Lond. A.* — 1981. — V. 377. — P. 431 – 448.

- [16] Connerade J.P. A study of 5p excitation in atomic barium I. The 5p absorption spectra of Ba I, Cs I and related elements / J.P. Connerade, M.W.D. Mansfield, G.H. Newsom, D.H. Tracy, M.A. Baig, K. Thimm // [Phil. Trans. R. Soc. A. — 1979. — V. 290. — No. 1371. — P. 327 – 352.](#)
- [17] White M.D. The ejected-electron spectrum of strontium vapor autoionising and Auger levels excited by 23.5 to 500 eV electrons / M.D. White, D. Rassi, K.J. Ross // [J. Phys. B. — 1979. — V. 12, — P. 315 – 322.](#)
- [18] Nagata T. Single and double photoionization of Sr atoms between 38 and 50 nm / T. Nagata, J. B. West, T. Hayaishi, Y. Itikawa, Y. Itoh, T. Koizumi, J. Murakami, Y. Sato, H. Shibata, A. Yagishita // [J. Phys. B. — 1986. — V. 19. — P. 1281 – 1290.](#)
- [19] Rassi D. The ejected-electron spectrum of barium vapours autoionising and Auger levels excited by 20-500 eV electrons / D. Rassi, K.J. Ross // [J. Phys. B. — 1980. — V. 13. — P. 4683 – 4694.](#)
- [20] Trajmar S. Electron-metal atom collisions cross sections / S. Trajmar, W. Williams // 1976 (Physics of Ionised Gases) ed. B. Navinsek (Yugoslavia: J. Stephen Institute) p. 199.

Стаття надійшла до редакції 5.05.2020

В.А. Боровик¹, И.И. Шафраньош¹, А.А. Боровик^{1,2}

¹Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54, Украина, e-mail: vladimir.borovik@uzhnu.edu.ua

²Институт электронной физики НАНУ, 88000, Ужгород, ул. Университетская, 21, Украина

ДВУХСТУПЕНЧАТАЯ АВТОИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ СТРОНЦИЯ И БАРИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Путем сравнительного анализа экспериментальных спектров испущенных электронов и фотовозбуждения с теоретическими данными по сечениям возбуждения и вероятностям распада автоионизационных состояний в атомах стронция и бария показано, что основными процессами образования ионов Sr^{2+} и Ba^{2+} при электрон-атомных столкновениях являются двухступенчатый и двухэлектронный распад атомных автоионизационных состояний $p^5 n l n_1 l_1 n_2 l_2$.

Ключевые слова: электрон, атом, оболочка, состояние, ионизация, автоионизация.

V.O. Borovik¹, I.I. Shafranyosh¹, O.O. Borovik^{1,2}¹Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshyna Str., 54, Ukraine,
e-mail: vladimir.borovik@uzhnu.edu.ua²Institute of Electron Physics NAS of Ukraine, 88017, Uzhgorod, Universytetska Str., 21, Ukraine

TWO-STEP AUTOIONIZATION OF STRONTIUM AND BARIUM ATOMS EXCITED BY ELECTRON IMPACT

Background: The presence in alkaline earth atoms of a closed valence shell makes the processes of their electronic excitation and ionization more complex than those in other atoms. This also applies to the influence of autoionization processes on electron-impact ionization of alkaline earth atoms. The fast rise of the single ionization cross section immediately beyond the excitation threshold of the outer p^6 shell, the resonant shape of the cross section in this energy region, as well as its sharp decline at impact energies just 5–6 eV above the p^6 shell excitation threshold and, at the same time, a sharp rise of the double ionization cross section - all this indicated the existence of additional electron decay channels for high-energy atomic autoionizing states $np^5nl_nl_1n_2l_2$ in Sr ($n = 4$) and Ba ($n = 5$) atoms. This work is devoted to the study of these decay channels.

Methods: The measurements of the ejected-electron spectra of Sr and Ba atoms were carried out at an impact energy value of 100 eV by using an electron spectrometer consisted of a source of the incident electron beam, an electron energy analyzer (of 127° electrostatic type) and a resistively heated atomic beam source. The incident and ejected-electron energy resolutions were about 0.4 eV and 0.07 eV, respectively.

Results: By comparative analysis of experimental ejected-electron spectra and photoexcitation spectra with theoretical data on excitation cross sections and decay probabilities of autoionizing states in Sr and Ba atoms, it is shown that two-step and two-electron decay channels are most preferable for $p^5nl_nl_1n_2l_2$ atomic autoionizing states.

Conclusions: The two-step and two-electron decay processes of the high-energy states $p^5nl_nl_1n_2l_2$ in Sr and Ba atoms, studied in this work, are the main reason for the high formation efficiency of Sr^{2+} and Ba^{2+} ions, which leads to an abrupt increase in the double-ionization cross section of these atoms by electron impact.

Keywords: : electron, atom, subshell, state, ionization, autoionization.

REFERENCES

- [1] Kaneko, Y. (1961), "Single and double ionization of Na, K and Mg by electron impact", [J. Phys. Soc. Jap., V. 16, pp. 2288–2293.](#)
- [2] Okudaira, S. (1970) "Multiple ionization of Ca, Sr and Ba by electron impact", [J. Phys. Soc. Jap., V. 29, pp. 409 – 415.](#)
- [3] Okyno, Y. (1971) "Ionization cross section of Ca, Sr and Ba by electron impact", [J. Phys. Soc. Jap., V. 31, pp. 1189 – 1195.](#)
- [4] Veinshtein, L.A., Ochkur, V.I., Rakhovskii, V.I., Stepanov, A.M. (1972) "Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium", *Sov. Phys. – JETP*, V. 34, pp. 271 – 275.
- [5] Hansen, J.E. (1975) "The structure of the autoionizing p^5ds configurations in MgII, CaII, SrII and BaII and interpretation of electron impact cross sections for these ions", [J. Phys. B., V. 8, pp. 2759 – 2770.](#)

- [6] Hansen, J.E. (1975) "Interpretation of the 21.2 eV photo-electron spectrum of atomic Ba", *J. Phys. B.*, V. 8, pp. L403 – L406.
- [7] Connerade, J.P., Rose, S.J., Grant, I.P. (1979) "Two-step autoionization and the double ionization anomaly in BaI", *J. Phys. B.*, V. 12, pp. L53 – L55.
- [8] Hotop, H., Mahr, D. (1975) "On the 584.3 Å photoelectron spectrum of Ba", *J. Phys. B.*, V. 8, pp. L301-L304.
- [9] Kupliauskiene, A., Kerevičius, G., Borovik, V., Shafranyosh, I., Borovik, A. (2017) "The energy structure and decay channels of the $4p^6$ -shell excited states in Sr", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, V. 50, p. 225201 (14p).
- [10] Hrytsko, V., Kerevicius, G., Kupliauskiene, A., Borovik, A. (2016) "The 5p autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, V. 49, p. 145201(12p).
- [11] Borovik, V., Shafranyosh, I., Borovik, O. (2020) "Excitation-autoionization contribution to single ionization of Sr by electron impact", *Phys. Scr.*, V. 95, p. 065404 (7p).
- [12] Borovik, V., Roman, V., Kupliaskiene, A., Shafranyosh, I., Borovik, O. (2019) "Excitation-autoionization of the $5p^6$ subshell in Ba atoms", *Eur. Phys. J. D.*, V. 73; 43, (5p).
- [13] Borovik, A.A., Grum-Grzhimailo, A.N., Bartschat, K., Zatsarinny, O. (2005) "Electron impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium", *J. Phys. B.*, V. 38, pp. 1081 – 1092.
- [14] Borovik, A.A. (2008) "An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors", *Ukr. Phys. J.*, V. 53, No. 10, pp.1021 – 1027.
- [15] Mansfield, M.W.D., Newsom, G.H. (1981) "The SrI absorption spectrum in the vacuum ultraviolet: excitation of the 4p-subshell", *Proc. R. Soc. Lond. A.*, V. 377, pp. 431 – 448.
- [16] Connerade, J.P., Mansfield, M.W.D., Newsom, G.H., Tracy, D.H., Baig, M.A., Thimm, K. (1979) "A study of 5p excitation in atomic barium I. The 5p absorption spectra of Ba I, Cs I and related elements", *Phil. Trans. R. Soc. A.*, V. 290, No. 1371, pp. 327 – 352.
- [17] White, M.D., Ross, K.J. (1979) "The ejected-electron spectrum of strontium vapor autoionising and Auger levels excited by 23.5 to 500 eV electrons", *J. Phys. B.*, V. 12, pp. 315 – 322.
- [18] Nagata, T., West, J.B., Hayaishi, T., Itikawa, Y., Itoh, Y., Koizumi, T., Murakami, J., Sato, Y., Shibata, H., Yagishita, A. (1986) "Single and double photoionization of Sr atoms between 38 and 50 nm", *J. Phys. B.*, V. 19, pp. 1281 – 1290.
- [19] Rassi, D., Ross, K.J. (1980) "The ejected-electron spectrum of barium vapours autoionising and Auger levels excited by 20-500 eV electrons", *J. Phys. B.*, V. 13, pp. 4683 – 4694.
- [20] Trajmar, S., Williams, W. (1976) "Electron-metal atom collisions cross sections", (Physics of Ionised Gases) ed. B. Navinsek (Yugoslavia: J. Stephen Institute) p. 199.