

УДК: 539.184/186

PACS: 34.80.Dp

DOI 10.24144/2415-8038.2018.44.119-125

В.О. Боровик

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

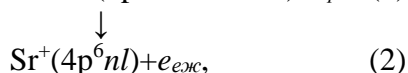
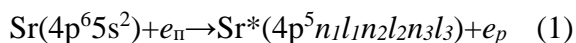
АВТОІОНІЗАЦІЯ АТОМА СТРОНЦІЮ ПРИ ЗБУДЖЕННІ 4p⁶ ОБОЛОНКИ

Експериментально, шляхом визначення сумарної інтенсивності ліній в електронних спектрах, що утворюються при розпаді атомних автоіонізаційних станів 4p⁵n₁l₁n₂l₂n₃l₃, одержано переріз авто-іонізації атома стронцію в діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження 4p⁶ оболонки при 20.98 еВ до 600 еВ. Поведінка перерізу характеризується наявністю резонансної структури у припороговій області енергій 21-30 еВ і широкого максимуму поблизу 100 еВ. Максимальне значення перерізу складає 1.6·10⁻¹⁶ см² при 24.8 еВ. Проведено аналіз процесів збудження та розпаду автоіонізаційних станів, які визначають величину і енергетичну залежність одержаного перерізу автоіонізації.

Ключові слова: електрон, атом стронцію, оболонка, стан, конфігурація, автоіонізація, поперечний переріз.

Вступ

Електронне збудження 4p⁶ оболонки і наступний нерадіаційний розпад утворених автоіонізаційних станів (т. зв. процес «збудження-автоіонізація») для атома стронцію може бути представлений наступними реакціями



де $e_{\text{п}}$, e_p , $e_{\text{еж}}$ визначають відповідно первинний, розсіяний та ежектований електрони.

Автоіонізація (2) є непрямим іонізаційним процесом, який суттєво збільшує повний переріз іонізації атома при енергіях вище порогу збудження відповідної електронної оболонки. Для атома стронцію внесок автоіонізації (2) в повний переріз іонізації електронним ударом становить більш ніж 16% [1]. Дослідження цього автоіонізаційного внеску (або перерізу автоіонізації) в плані його абсолютного значення, енергетичної залежності, ролі в його формуванні різних електронних конфігурацій неможливі традиційними методами дослідження іонізації, що

засновані на вимірах повного іонного струму. Це пов'язано з тим, що іонізаційна і автоіонізаційна компоненти іонного струму експериментально не розрізняються. Між тим, як було показано в дослідженнях автоіонізації атомів лужних металів [2, 3], виміри електронних автоіонізаційних спектрів в широкому діапазоні енергій зіткнень і визначення їх повної інтенсивності дозволяє отримати з прийнятною точністю не тільки абсолютне значення перерізу автоіонізації, але і його енергетичну поведінку. Останнім часом ця методика була успішно використана для дослідження перерізу автоіонізації атома барію в енергетичній області від порогу збудження 5p⁶ оболонки до 600 еВ [4].

З метою пошуку закономірностей і відмінностей перебігу автоіонізаційних процесів у лужноземельних атомах, в даній роботі досліджено переріз автоіонізації атома стронцію при збудженні електронним ударом його зовнішньої 4p⁶ оболонки.

Експериментальна установка і методичні аспекти вимірів

Дослідження проведені на комплексі експериментальної апаратури для дослідження високотемпературних парів

атомів лужноземельних металів [5, 6] (див. рис. 1). До його складу входили електронний спектрометр та системи вакуумної відкачки СВВ, електроживлення СЖ і детектування корисного сигналу АСД. Електронний спектрометр

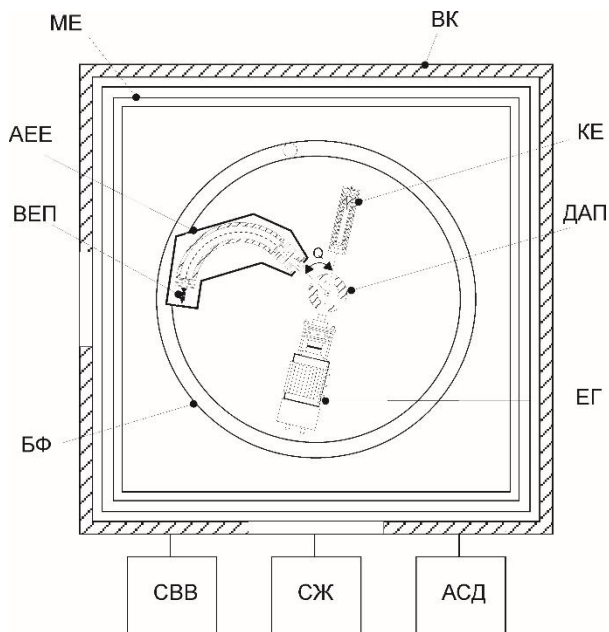


Рис. 1. Блок-схема комплексу експериментальної апаратури для дослідження електронних спектрів атомів металів: ВК - вакуумна камера; СВВ – система вакуумної відкачки; СЖ – система живлення; АСД – автоматизована система детектування корисного сигналу ЕГ – електронна гармата; МЕ – магнітний екран вакуумної камери; АЕЕ – аналізатор енергій електронів; ДАП – джерело атомного пучка; КЕ – колектор первинних електронів; БФ – базовий фланець; ВЕП - вторинний електронний помножувач.

складався з джерела первинного електронного пучка ЕГ, джерела атомного пучка ДАП та аналізатора енергій ежектованих електронів АЕЕ. Дослідження спектрів у припороговій області енергій виконувалися із застосуванням в якості джерела електронного пучка 127° електростатичного монохроматора [7]. Для досліджень при енергіях зіткнень більше 50 еВ використовувалась 5-ти електродна електронна гармата ЕГ [7] (див. рис. 1). При типовій інтенсивності електронного пучка 0.1 мкА його моноенергетичність на виході монохроматора або гармати складала відповідно ≤ 0.1 еВ та ≤ 0.4 еВ. Ці параметри визначалися за шириною піка пружного розсіювання в спектрах втрат енергії розсіяних електронів. Похибки шкал енергій

первинних і ежектованих електронів становили ± 0.1 еВ і ± 0.05 еВ відповідно.

Для енергетичного аналізу розсіяних і ежектованих електронів застосовувався 127° електростатичний циліндричний дефлектор з енергетичною і кутовою роздільною здатністю 0.07 еВ і 3° відповідно. Він був встановлений під “магічним” кутом спостереження 54.7° до напрямку первинного електронного пучка. Це значення кута відповідає мінімальному впливу анізотропії кутового розподілу ежектованих електронів на енергетичну залежність інтенсивності ліній в спектрах ежектованих електронів [8].

Особливістю конструкції джерела атомного пучка було об’єднання функцій камери зіткнень і охолоджуваної пастки для конденсації атомних парів. Це дало змогу ефективно екранувати область взаємодії електронного і атомного пучків і тим самим стабілізувати температурний режим камери зіткнень, аналізатора та джерела електронного пучка. Цілісність конструкції також забезпечувала захист зовнішнього об’єму вакуумної камери від проникнення пари досліджуваного металу. Конструкція джерела була розрахована на робочу температуру не менше 700°C . Виміри електронних спектрів атомів стронцію було проведено при типовому значенні температури джерела 550°C .

Спектри ежектованих електронів атомів стронцію вимірювалися для різних значень енергії первинного електронного пучка, починаючи з порогу збудження оболонки $4p^6$ при 20.98 еВ [9] до 600 еВ. Мінімальний крок зміни енергії становив 0.1 еВ у припороговій області. Приклади спектрів ежектованих електронів атома стронцію для значень енергії первинних електронів 27.7, 42 і 102 еВ представлені на рис. 2.

Як можна бачити, кількість та інтенсивність ліній в спектрах суттєво змінюються зі зміною енергії зіткнень. Зокрема, із збільшенням енергії зіткнень число ліній збільшується, а деякі з них з’являються в спектрах групами по дві-чотири лінії одночасно, що вказує на багатоканальність розпаду певних автоіонізаційних станів. Помітний також

суттєвий перерозподіл інтенсивності ліній на енергетичних ділянках 15-17 еВ та 17-20 еВ.

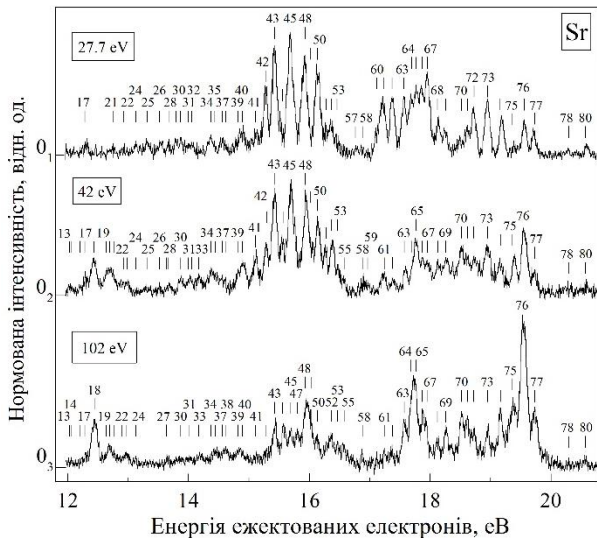
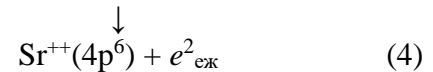
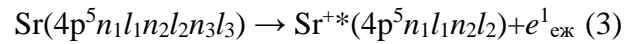


Рис. 2. Спектри ежкетованих електронів атома стронцію для різних значень енергії первинного електронного пучка. Нумерація ліній згідно роботи [10].

У відповідності з методикою [2, 3], переріз автоіонізації атома стронцію при збудженні $4p^6$ оболонки визначався як сума нормованих інтенсивностей ліній, що відповідають електронному розпаду станів $4p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$, в спектрах, виміряних для різних значень енергії первинних електронів. Остаточне значення перерізу визначалося як середнє значення даних трьох незалежних вимірів. З врахуванням зміни експериментальних умов у продовж вимірів, повна невизначеність складала 45% при енергіях нижче 30 еВ та 30% для більш високих енергій. Одержаний переріз у відносних одиницях переводився в абсолютні одиниці нормуванням на розрахований переріз збудження стану $4p^54d5s^2\ ^3P_1$ при енергії зіткнень 600 еВ [9] (лінія 43 в спектрах на рис. 2).

Слід зазначити особливість застосування методики [2, 3] при дослідженні атомних автоіонізаційних станів в атомах лужноземельних металів, і зокрема стронцію. Наявність у нього двохвалентної s -оболонки знижує поріг збудження іонних автоіонізаційних станів $4p^5n_1l_1n_2l_2$ до 26.92 еВ [10, 11], що створює для високоенергетичних атомних автоіонізаційних станів $4p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$

додатковий канал електронного розпаду, а саме



Як було показано раніше [9], саме цей канал розпаду є відповідальним за незначну інтенсивність або повну відсутність в спектрах ежкетованих електронів ліній, пов'язаних з розпадом атомних автоіонізаційних станів з енергетичними порогоми вище 26.9 еВ. Енергії електронів $e^2_{\text{еж}}$ не перевершують 1-2 еВ і тому канал розпаду (4) не може бути спостережуваним в досліджених спектрах. Таким чином, одержуваний за методикою [2, 3] переріз автоіонізації при енергіях зіткнень вище 27 еВ має бути меншим за повний переріз автоіонізації атома стронцію при збудженні $4p^6$ оболонки. Однак, як показав аналіз перерізу двократної іонізації атома стронцію електронним ударом [1], в зазначеній області енергій зіткнень частка даного каналу розпаду може становити не більше 5% від повного перерізу автоіонізації.

Результати й обговорення

На рис. 3 представлено одержаний в даній роботі переріз автоіонізації атома стронцію $\sigma_{\text{авт}}$. Як можна бачити, основною особливістю перерізу є сильний припороговий максимум з резонансною структурою a і b . Переріз сягає свого максимального значення $1.6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ при енергії зіткнень 24.8 еВ (резонанс a), що складає 16% від значення повного перерізу іонізації атома стронцію [1].

Виразний резонансний характер перерізу автоіонізації в діапазоні 21-35 еВ відображає наявність сильних резонансів негативних іонів у перерізах електронного збудження автоіонізаційних станів в конфігураціях $4p^54d5s^2$, $4p^54d^25s$, $4p^55s^25p$ [12]. З другого боку, різке падіння перерізу зразу за порогом збудження найвищого за енергією стану $4d^2(^3F)(^4F)7d\ ^5F_1$ при 28.53 еВ [9], електронний розпад якого ще спостерігається в спектрах ежкетованих електронів [13, 14], вказує на наявність

процесу двоетапного розпаду автоіонізаційних станів з порогами збудження вище 29 еВ (див. реакції (3) та (4)).

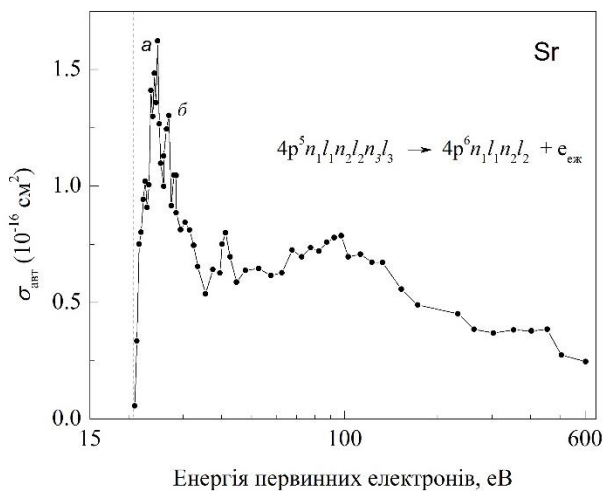


Рис. 3. Переріз автоіонізації $\sigma_{\text{авт}}$ атома стронцію при збудженні $4p^6$ оболонки електронним ударом. Вертикальною пунктирною лінією позначено поріг збудження $4p^6$ оболонки при 20.98 еВ [10].

Синглетні автоіонізаційні стани, а також стани, що формуються в результаті дипольних переходів ($\Delta J = 1$) і які складають більшість з ідентифікованих станів з порогами вище 25 еВ (див. таблицю 2 в роботі [9]), визначають енергетичну залежність перерізу автоіонізації атома стронцію при енергіях зіткнень вище 60 еВ. На рисунку 4 порівняно переріз автоіонізації атома стронцію з перерізом автоіонізації атома барію при збудженні у останнього $5p^6$ оболонки [4]. Як видно, за загальним виглядом енергетичних залежностей ці дані подібні, що говорить про спільні за характером процеси формування перерізів – утворення резонансів негативних іонів у припороговій області енергій і внесок електронного розпаду синглетних та дипольно дозволених станів при великих енергіях зіткнень. Більший у два рази переріз автоіонізації атома барію відповідає більшій ефективності збудження його $5p^6$ оболонки. Краща енергетична відокремленість припорогових резонансів в автоіонізаційному перерізі барію пов'язана з більшим, майже у два рази, значенням спин-орбітального розщеплення $5p^6$ оболонки ($\Delta E \sim 2$ еВ) [9].

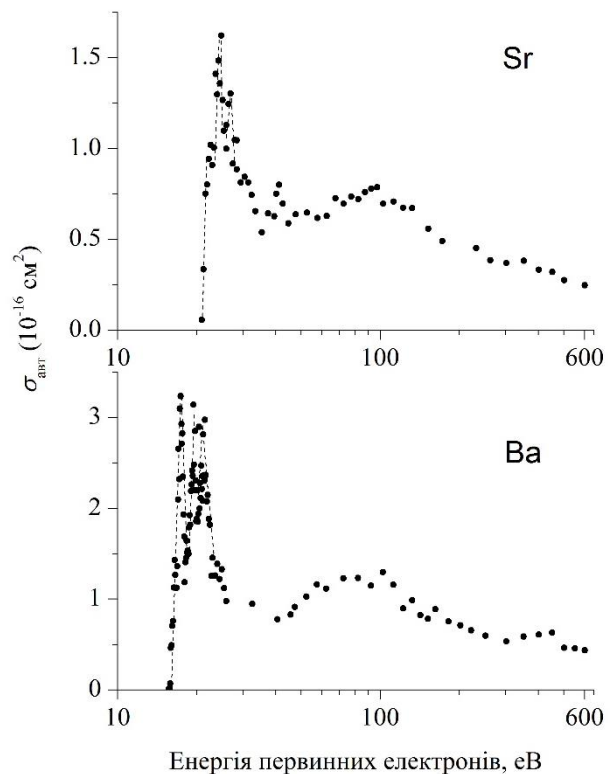


Рис. 4. Перерізи автоіонізації атомів стронцію і барію. Пунктирними лініями виділені контури припорогових резонансів.

Висновки

Представлено переріз автоіонізації атома стронцію при збудженні $4p^6$ оболонки електронами в діапазоні енергій зіткнень від порогу збудження до 600 еВ. Дані одержані у вигляді нормованих повних інтенсивностей спектрів ежектованих електронів, що утворюються при розпаді автоіонізаційних станів $4p^5 n_1 l_1 n_2 l_2 n_3 l_3$. Розглянуто роль окремих електронних конфігурацій у формуванні перерізів автоіонізації. Зокрема показано, що ефективно резонансне збудження автоіонізаційних станів в конфігураціях $4p^5 4d 5s^2$, $4p^5 4d^2 5s$, $4p^5 5s^2 5p$ визначає резонансну поведінку перерізу при низьких енергіях зіткнень. Форма і значення перерізу при великих енергіях зіткнень визначаються внеском дипольно дозволених та синглетних станів в конфігураціях $4p^5 4d 5s^2$ та $4p^5 4d^2 5s$.

Автор висловлює подяку д.ф.-м.н., професору І.І. Шафраньошу за корисні поради та продуктивне обговорення результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Veinshtein L. A., Ochkur V. I., Rakhovskii V.I., Stepanov A. M. Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium // *Sov. Phys. – ЖЕТР.* – 1972. – V. 34, – P. 271-275.
2. Evrij M. J., Borovik A. A. (Jr), Shimon L. L., Kontros J. E., Borovik A. A. Resonance excitation of the $3p^6$ -subshell in potassium: Contribution to the single ionization // *Nucl. Instrum. Methods B.* – 2005. – V. 233, – P. 280-283.
3. Borovik A., Kupliauskiene A. The $5p^6$ autoionization cross section of cesium atoms: contribution to single ionization by electron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2009. – V. 42, – P. 165202(5).
4. Боровик В.О., Шафраньош І.І., Боровик О.О. Перерізи автоіонізації атомів цезію та барію при збудженні $5p^6$ оболонки електронним ударом // *Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика.* – 2018. - № 43, – С. 81-88.
5. Borovik A. A., Grum-Grzhimailo A. N., Bartschat K., Zatsarinny O. Electron impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2005. – V. 38, – P. 1081-1092.
6. Hrytsko V., Kerevicius G., Kupliauskiene A., Borovik A. The $5p$ autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2016. – V. 49, – P. 145201(12).
7. Borovik A.A. An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors // *Ukr. Phys. Journal.* – 2008. – V. 53, – No 10, – P. 1021-1027.
8. Berezhko E.G., Kabachnik N.M. Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of X-rays and Auger electrons // *J. Phys. B.* – 1977. – V. 10, – P. 2467-2477.
9. White M.D., Rassi D., Ross K.J. The ejected-electron spectrum of strontium vapour autoionising and Auger levels excited by 23.5 to 500 eV electrons // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1979. – V. 12, – P. 315-322.
10. Kupliauskiene A., Kerevicius G., Borovik V., Shafranyosh I., Borovik A. The energy structure and decay channels of the $4p^6$ -shell excited states in Sr // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1979. – V. 50, – P. 22520(14).
11. Nagata T. *et al.* Single and double photoionisation of Sr atoms between 38 and 50 nm // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1986. – V. 19, – P. 1281-1290.
12. Borovik A.A., Vakula V.V., Kupliauskiene A.V. Classification and excitation dynamics of the $4p^6$ -core excited lowest autoionizing states in strontium // *Lith. J. Phys.* – 2007. – V. 47, – No. 2, – P. 129–135.
13. Schmitz W., Breuckmann B., Mehlhorn W. Low-energy electron spectra of atomic Ca and Sr excited by 2 keV electrons // *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* – 1976. – V. 9, – P. L493–497.
14. Казаков С.М., Христофоров О.В. Электронные спектры автоионизационных состояний стронция и кальция, возбуждаемых электронами низких и промежуточных энергий // *ЖЭТФ.* – 1985. –Т. 88, – № 4, – С. 1118–1130.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2018 р.

В.А. Боровик

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

АВТОИОНИЗАЦИЯ АТОМА СТРОНЦИЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ $4p^6$ ОБОЛОЧКИ

Експериментально, путем определения суммарной интенсивности линий в электронных спектрах, образующихся при распаде атомных автоионизационных состояний $4p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$, получено сечение автоионизации атома стронция в диапазоне энергий столкновений от порога возбуждения $4p^6$ оболочки при 20.98 эВ до 600 эВ. Поведение сечения характеризуется наличием резонансной структуры в припороговой области энергий 21-30 эВ и широкого максимума вблизи 100 эВ. Максимальное значение сечения составляет $1.6 \cdot 10^{-16}$ см² при 24.8 эВ. Проведен анализ процессов возбуждения и распада автоионизационных состояний, которые определяют величину и энергетическую зависимость полученного сечения автоионизации.

Ключевые слова: электрон, атом стронция, оболочка, состояние, конфигурация, автоионизация, сечение.

V.O. Borovik

Uzhgorod National University, Ukraine, 88000, Uzhgorod, Universitetska Str., 21

THE $4p^6$ AUTOIONIZATION OF STRONTIUM ATOM

Background: Autoionization is an indirect ionization process that significantly increases the total ionization cross section of the atom above the excitation threshold of the corresponding electron shell. For strontium atom, the autoionization contribution to the total ionization cross section by electron impact is more than 16%. Measurements of electron autoionizing spectra in a broad range of impact energies and the determination of their total intensity allow obtaining with an acceptable accuracy not only the absolute value of the autoionization contribution (the autoionization cross section), but also its energy behavior. In this paper, the $4p^6$ autoionization cross section of strontium atoms is investigated in the impact-energy range from the excitation threshold of the $4p^6$ shell to 600 eV.

Methods: The study of the ejected-electron spectra of strontium atoms were carried out by using an electron spectrometer consisted of a source of the incident electron beam, an electron energy analyzer (of 127° electrostatic type) and an atomic beam source. To minimize the influence of the anisotropy of the angular distribution of ejected electrons, the measurements were carried out at a "magic" observation angle of 54.7°. The incident and ejected-electron energy resolutions were about 0.4 eV and 0.07 eV, respectively. The increment step of the incident electron energy was 0.1 eV in the near-threshold energy region. The autoionization cross section of strontium atoms was determined as the normalized total intensities of ejected-electron spectra measured at different impact energies.

Results: The autoionization cross sections for $4p^6$ shell of strontium atoms were determined in an incident-electron energy range from the lowest autoionization thresholds up to 600 eV. The energy behavior of the cross section is characterized by the presence of the strong resonance structure in the threshold region of 21-30 eV and a broad maximum at approximately 100 eV. The cross section reaches its maximum value of $1.6 \cdot 10^{-16}$ cm² at 24.8 eV. An analysis is made of the excitation and decay processes of the $4p^5n_1l_1n_2l_2n_3l_3$ autoionizing states that determine the magnitude and the energy behavior of the measured autoionization cross section.

Conclusions: The strong resonant excitation of the levels in $4p^5 4d 5s^2$, $4p^5 4d^2 5s$, and $4p^5 5s^2 5p$ configurations determines the resonant behavior of the measured autoionization cross section at low impact energies. The shape and magnitude of the cross section at high impact energies are determined by the total contribution from dipole-allowed and singlets autoionizing levels in the configurations $4p^5 4d 5s^2$, $4p^5 4d^2 5s$.

Key words: electron, strontium atom, shell, state, configuration, autoionization, cross section.

PACS NUMBER: 34.80.Dp

REFERENCES

1. Veinshtein L. A., Ochkur V. I., Rakhovskii V.I., Stepanov A. M. Absolute values of electron impact ionization cross sections for magnesium, calcium, strontium and barium // *Sov. Phys. – JETP.* – 1972. – V. 34, – P. 271-275.
2. Evrij M. J., Borovik A. A. (Jr), Shimon L. L., Kontros J. E., Borovik A. A. Resonance excitation of the $3p^6$ -subshell in potassium: Contribution to the single ionization // *Nucl. Instrum. Methods B.* – 2005. – V. 233, – P. 280-283.
3. Borovik A., Kupliauskiene A. The $5p^6$ autoionization cross section of cesium atoms: contribution to single ionization by electron impact // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2009. – V. 42, – P. 165202(5).
4. Borovik V.O., Shafranyosh I.I., Borovik O.O. Autoionization cross sections of cesium and barium atoms for $5p^6$ shell excited by electron impact // *Uzhgorod University Scientific Herald. Series Physics.* – 2018. - № 43, – C. 81-88.
5. Borovik A. A., Grum-Grzhimailo A. N., Bartschat K., Zatsarinny O. Electron impact excitation of the $(3p^5 4s^2)^2 P_{3/2,1/2}$ autoionizing states in potassium // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2005. – V. 38, – P. 1081-1092.
6. Hrytsko V., Kerevicius G., Kupliauskiene A., Borovik A. The $5p$ autoionization spectra of Ba atoms excited by electron impact: identification of lines // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2016. – V. 49, – P. 145201(12).
7. Borovik A.A. An electron spectrometer for studying the autoionization processes in metal vapors // *Ukr. Phys. Journal.* – 2008. – V. 53, – No 10. – P. 1021-1027.
8. Berezko E.G., Kabachnik N.M. Theoretical study of inner-shell alignment of atoms in electron impact ionisation: angular distribution and polarisation of X-rays and Auger electrons // *J. Phys. B.* – 1977. – V. 10, – P. 2467-2477.
9. White M.D., Rassi D., Ross K.J. The ejected-electron spectrum of strontium vapour autoionising and Auger levels excited by 23.5 to 500 eV electrons // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1979. – V. 12, – P. 315-322.
10. Kupliauskiene A., Kerevicius G., Borovik V., Shafranyosh I., Borovik A. The energy structure and decay channels of the $4p^6$ -shell excited states in Sr // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1979. – V. 50, – P. 22520(14).
11. Nagata T. *et al.* Single and double photoionisation of Sr atoms between 38 and 50 nm // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1986. – V. 19, – P. 1281-1290.
12. Borovik A.A., Vakula V.V., Kupliauskiene A.V. Classification and excitation dynamics of the $4p^6$ -core excited lowest autoionizing states in strontium // *Lith. J. Phys.* – 2007. – V. 47, – No. 2. – P. 129–135.
13. Schmitz W., Breuckmann B., Mehlhorn W. Low-energy electron spectra of atomic Ca and Sr excited by 2 keV electrons // *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* – 1976. – V. 9, – P. L493–497.
14. Kazakov S.M., Khristoforov O.V. Electron spectra from autoionizing states of strontium and calcium excited by low- and intermediate-energy electrons // *Sov. Phys. – JETP.* – 1985. –V. 61(4), – P. 656–664.