

УТВОРЕННЯ ДВОЗАРЯДНИХ ІОНІВ ПРИ БАГАТОФОТОННІЙ ІОНІЗАЦІЇ АТОМІВ ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.В. Суран

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

Приведені результати досліджень процесу утворення двозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів лужноземельних елементів у видимій та інфрачервоній областях спектра. Встановлено, що у видимій області спектра реалізується каскадний механізм утворення двозарядних іонів, а в інфрачервоній - реалізується двоелектронний механізм їх утворення.

До початку досліджень процесу багатофотонної іонізації атомів лужноземельної та лантаноїдної груп, які були започатковані нами [1-3], основними об'єктами досліджень були атоми лужних металів та інертних газів [4]. Відмітимо, що при багатофотонній іонізації атомів лужних металів та інертних газів спостерігався лише процес утворення однозарядних іонів та досліджувався процес збудження одноелектронних зв'язаних рівнів.

При дослідженні процесу багатофотонної іонізації атомів лужноземельних елементів нами вперше був виявлений ефект утворення двозарядних іонів [1], а в [3] була передбачена можливість утворення багатозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів, що і було згодом підтверджено у різних науково-дослідних групах [5]. Відмітимо, що до моменту виявлення цього ефекту та передбачення можливості утворення багатозарядних іонів, в літературі були відсутні дані про можливість утворення дво- та багатозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів.

В [2-3] були запропоновані два можливі механізми утворення двозарядних іонів: каскадний та дво-електронний. У випадку реалізації каскадного механізму утворення двозарядних іонів проходить в результаті іонізації однозарядних іонів, а у випадку реалізації двоелектронного механізму - в результаті одночасного відриву двох

електронів від атомів. Відмітимо, що утворення одно- та двозарядних іонів проходить на протязі тривалості одного лазерного імпульсу. У випадку, коли напруженість поля лазерного випромінювання, яке використовується для іонізації атомів, значно менша від напруженості внутрішньоатомного поля ($\epsilon \approx 5 \times 10^9$ В/см), розглядаються лише ці два механізми для пояснення явища утворення двозарядних іонів.

Виявлення ефекту утворення двозарядних іонів стимулювало проведення досліджень процесу утворення дво- та багатозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів із різних груп, проведення досліджень по вивченню закономірностей, особливостей та механізму утворення цих іонів в різних спектральних областях, при різній поляризації випромінювання та при різних тривалостях лазерного імпульсу [5]. Очевидно, що утворення одно- та двозарядних іонів при багатофотонній іонізації лужноземельних атомів може бути зумовлено проявом кореляцій двох зовнішніх електронів, оскільки на зовнішній оболонці знаходяться два s-електрони, які з великою імовірністю одночасно збуджуються.

Для виявлення закономірностей та особливостей утворення одно- та двозарядних іонів, для встановлення механізму утворення двозарядних іонів та для розвитку нових теоретичних методів опису взаємодії лазерного випромінювання з атомами, які мають складний спектр,

необхідно проведення систематичних досліджень процесу багатофотонної іонізації лужноземельних атомів в різних спектральних областях. Такі дослідження виконуються в науково-дослідній групі при кафедрі квантової електроніки, яка займається вивченням взаємодії лазерного випромінювання з атомами. В цю групу входять д.ф.-м.н., с.н.с В.В. Суран, к.ф.-м.н., с.н.с. І.І. Бондар, н.с. М.І. Дудич, а також два інженерних працівники.

В результаті проведених досліджень, було започатковано розвиток чотирьох нових наукових напрямків:

- 1) дослідження процесу утворення дво- та багатозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів;
- 2) дослідження процесу утворення однозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів, які мають складний спектр;
- 3) вимірювання ефективних перерізів багатофотонної іонізації однозарядних іонів,
- 4) дослідження збурення рівнів в умовах сильної залежності їх динамічної поляризованості від частоти лазерного випромінювання.

Крім того проводяться дослідження присвячені вимірюванню динамічних поляризованостей рівнів та ефективних перерізів багатофотонної іонізації атомів.

В даній статті будуть розглянуті лише результати досліджень процесу утворення двозарядних іонів при багатофотонній іонізації лужноземельних атомів в різних спектральних областях.

В дослідженнях використовувався метод пересічення пучка атомів з лазерним випромінюванням. Лазерне випромінювання фокусувалось в центр атомного пучка. Іони із області взаємодії пучків витягувались за допомогою постійного електричного поля. Після розділення їх в часопролітному мас-спекрометрі по масі або заряду реєструвались вторинним електронним помножувачем. Імпульси, які відповідають іонам певної маси або заряду, після їх підсилення аналізувались за допомогою запам'ятовуючого осцилографа.

Для встановлення механізму утворення двозарядних іонів при багатофотонній іонізації атомів проводилися дослідження залежностей виходу цих іонів від інтенсивності та частоти лазерного випромінювання. Відмітимо, що для отримання більш повної інформації про механізм утворення двозарядних іонів, дослідження частотних залежностей проводилося при лінійній та циркулярній поляризації лазерного випромінювання. В першому випадку можна встановити механізм утворення двозарядних іонів в області частот, де відсутні резонансні процеси утворення цих іонів, в другому випадку - в областях частот де мають місце резонансні процеси утворення двозарядних іонів. Резонансні процеси утворення двозарядних досліджувались в областях частот $\omega = 15000 - 19000 \text{ см}^{-1}$ (видима область) та $\omega = 8100 - 9500 \text{ см}^{-1}$ (інфрачервона область).

Спочатку розглянемо процес утворення двозарядних іонів кальцію, стронцію та барію у видимій області спектра $\omega = 15000 - 19000 \text{ см}^{-1}$ [6-10]. Один із типових результатів досліджень залежностей виходу двозарядних іонів від частоти лазерного випромінювання у цій області спектра приведено на рис. 1. Відмітимо, що ці дослідження проводилися в діапазоні напруженостей лазерного випромінювання $\epsilon = 5 \times 10^6 - 10^7 \text{ В/см}$.

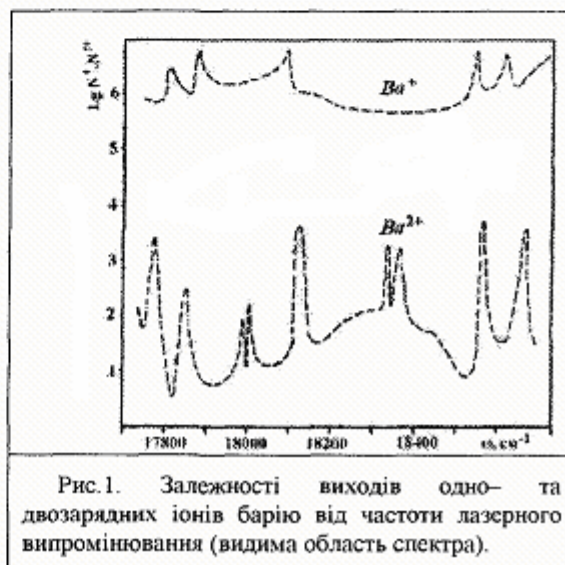


Рис.1. Залежності виходів одно- та двозарядних іонів барію від частоти лазерного випромінювання (видима область спектра).

Із результатів цих досліджень можна зробити ряд якісних висновків:

1. Спостерігається відносно великий вихід двозарядних іонів в порівнянні з виходом однозарядних іонів ($N^{2+}/N^+ = 10^{-5} - 10^{-1}$, де N^{2+} , N^+ виходи дво- та однозарядних іонів, відповідно). Величина відношення N^{2+}/N^+ залежить від частоти лазерного випромінювання. Найбільша величина відношення N^{2+}/N^+ спостерігається у випадках, коли у виході однозарядних іонів реалізується нерезонансний процес, а у виході двозарядних іонів – резонансний процес; найменша величина відношення N^{2+}/N^+ спостерігається у випадках, коли у виході однозарядних іонів реалізується резонансний процес, а у виході двозарядних іонів – нерезонансний процес.
2. В залежності $N^+(\omega)$ для іонів Sr^+ в діапазоні частот 17150 – 17350 cm^{-1} спостерігається зростання виходу іонів Sr^+ приблизно на три порядки в той же час, як в залежності $N^{2+}(\omega)$ для іонів Sr^{2+} спостерігається зменшення виходу цих іонів приблизно на порядок.
3. В залежностях $N^{2+}(\omega)$ спостерігається велика кількість резонансних максимумів як при лінійній, так і при циркулярній поляризації лазерного випромінювання.
4. В залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Ba^{2+} спостерігається ряд резонансних максимумів, які проявляються лише при циркулярній поляризації лазерного випромінювання.
5. Найбільша кількість резонансних максимумів спостерігається в залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Ba^{2+} , а найменша кількість – для іонів Ca^{2+} .
6. В більшості випадків резонансні максимуми в залежностях $N^+(\omega)$ і $N^{2+}(\omega)$ спостерігаються на різних частотах лазерного випромінювання.
7. В невеликій кількості випадків резонансні максимуми в залежностях $N^+(\omega)$ і $N^{2+}(\omega)$, отриманих при багатофотонній іонізації атомів Ca, Sr та Ba, спостерігаються на одних і тих же частотах або на близьких частотах.

8. Ширини резонансних максимумів в залежностях $N^{2+}(\omega)$ коливаються в широких межах від 5 до 100 cm^{-1} .

9. Резонансні максимуми в залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Ca^{2+} , Sr^{2+} та Ba^{2+} в деяких випадках мають асиметричну форму.

10. Амплітуди резонансних максимумів в залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Ca^{2+} , Sr^{2+} та Ba^{2+} коливаються в широких межах від одного до чотирьох порядків. Найбільші амплітуди резонансних максимумів спостерігаються в залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Sr^{2+} та Ba^{2+} .

11. Амплітуди резонансних максимумів в залежностях $N^+(\omega)$ для іонів Sr^+ та Ba^+ мають малу величину (біля одного порядку), а амплітуди резонансних максимумів в залежності $N^+(\omega)$ для іонів Ca^+ коливаються в досить великих межах від 0,3 до 3 порядків, причому більшість резонансних максимумів у виході іонів Ca^+ має амплітуду біля двох з половиною порядків.

Більшу частину резонансних максимумів для іонів Ca^{2+} , Sr^{2+} та Ba^{2+} , які спостерігаються в частотних залежностях при лінійній та циркулярній поляризації, вдалося однозначно ідентифікувати резонансними переходами в спектрі іонів Ca^+ , Sr^+ та Ba^+ , відповідно. Ці резонансні переходи реалізуються при іонізації однозарядних іонів як з основного, так і із перших збуджених $nd\ ^2D_{3/2,5/2}$ і $np\ ^2P^o_{1/2,3/2}$ станів. Цей факт однозначно доказує реалізацію каскадного механізму утворення двозарядних іонів.

Разом з тим в частотних залежностях для двозарядних іонів спостерігаються ряд резонансних максимумів, які не вдалося однозначно ідентифікувати. Це стосується тих резонансних максимумів які не вдалося ідентифікувати резонансними переходами в спектрі однозарядних іонів; а також тих які можна ідентифікувати резонансними переходами в спектрі однозарядних іонів лише при лінійній поляризації лазерного випромінювання. Не вдалося також однозначно ідентифікувати максимуми, які проявляються тільки при циркулярній

поляризації лазерного випромінювання, а також ті резонансні максимуми, які по частоті співпадають з максимумами у виході однозарядних іонів. Всі ці факти вказують на те, що в околі частот таких резонансних максимумів у виході двозарядних іонів реалізується механізм утворення двозарядних іонів, який не є каскадним.

Розглянемо тепер процес утворення двозарядних іонів стронцію та барію в інфрачервоній області спектра $\omega=8100-9500 \text{ см}^{-1}$ [11-15]. Треба відмітити, що до теперішнього часу, у цих областях спектра залежності $N^+(\omega)$ та $N^{2+}(\omega)$ для одно- та двозарядних іонів стронцію та барію та інших атомів не досліджувались у інших групах. Один із результатів досліджень залежностей виходу двозарядних іонів від частоти лазерного випромінювання у цій області спектра приведено на рис. 2. Відмітимо, що ці дослідження проводилися в діапазоні напруженостей лазерного випромінювання $\epsilon=5 \times 10^6-10^7 \text{ В/см}$. Із результатів цих досліджень можна зробити ряд якісних висновків:

1. Спостерігається аномально великий вихід двозарядних іонів у порівнянні з виходом однозарядних іонів ($N^{2+}/N^+=10^{-2}-10^{-1}$).

2. Відношення між виходом дво- та однозарядних іонів (N^{2+}/N^+) значно більше в інфрачервоній області спектра, ніж у видимій області спектра.

3. У залежностях $N^{2+}(\omega)$ спостерігається невелика кількість резонансних максимумів.

4. У більшості випадків резонансні максимуми у залежностях $N^+(\omega)$ та $N^{2+}(\omega)$ спостерігаються на одних і тих же частотах, в той час коли у видимій області реалізується обернена ситуація.

5. Ширина резонансних максимумів у залежностях $N^{2+}(\omega)$ коливаються у межах від 10 до 60 см^{-1} .

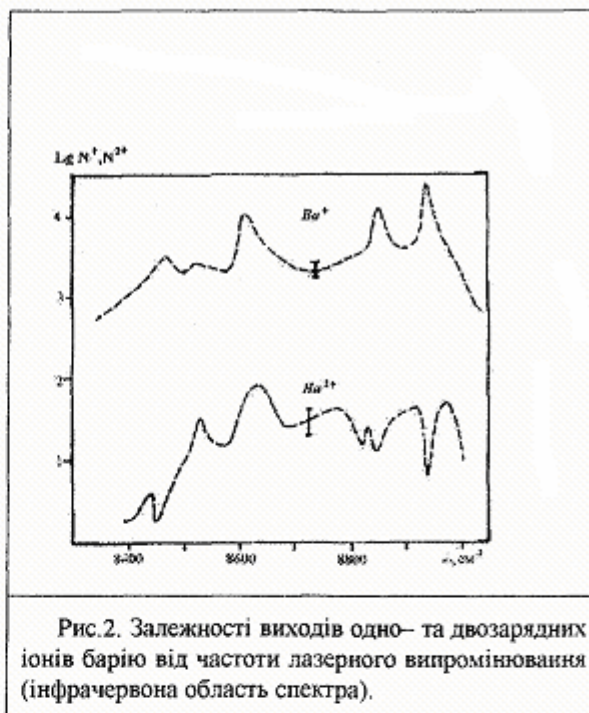


Рис.2. Залежності виходів одно- та двозарядних іонів барію від частоти лазерного випромінювання (інфрачервона область спектра).

6. Амплітуди резонансних максимумів у залежностях $N^{2+}(\omega)$ для іонів Sr^{2+} та Ba^{2+} досить малі, (біля одного порядку) в той же час, коли амплітуди резонансних максимумів у залежностях $N^{2+}(\omega)$ для цих же іонів у видимій області спектра мають величину три - чотири порядки.

7. Амплітуди резонансних максимумів для іонів Sr^+ та Ba^+ мають малу величину (біля одного порядку). Подібна величина амплітуди в залежностях $N^+(\omega)$ для цих же іонів спостерігається і у видимій області спектра.

8. У виході іонів Ba^{2+} на частоті 8938 см^{-1} спостерігається незвичний факт, який полягає в тому, що вихід цих іонів в околі частот реалізації резонансного максимуму у виході іонів Ba^+ різко спадає, тобто на частоті реалізації резонансного максимуму у виході іонів Ba^+ спостерігається резонансний мінімум виходу іонів Ba^{2+} .

Як вже відмічалось, на відміну від видимої області спектра, резонансні максимуми, які мають місце у виході двозарядних іонів, спостерігаються на тих же частотах, що і резонансні максимуми у виході однозарядних іонів. Аналіз показав, що резонансні максимуми у

виході однозарядних іонів є максимуми особливі. Частоти, на яких мають місце ці максимуми, співпадають з частотою однофотонного переходу між двома не збуреними рівнями, але не співпадають з частотою багатофотонного збудження цих рівнів. Вони зумовлені багатофотонним збудженням рівнів в умовах сильного їх збурення в полі лазерного випромінювання [16, 17]. Сильне збурення рівнів зумовлено не великою напруженістю поля лазерного випромінювання (як це спостерігалось в попередніх дослідженнях), а зумовлено сильною залежністю динамічної поляризованості рівнів від частоти лазерного випромінювання в околі частот, яка відповідає частоті однофотонного переходу між двома рівнями. Оскільки резонансні максимуми у виході одно- та двозарядних іонів співпадають по частоті, то природа цих резонансних максимумів повинна бути одна й та ж [18]. Таким чином, резонансні максимуми у виході двозарядних іонів можна ідентифікувати збудженням зв'язаних рівнів, які сильно збурюються в полі лазерного випромінювання. Разом з тим, відкритим залишається питання, яким чином два електрони одночасно відриваються від атома.

В результаті аналізу великої кількості отриманих нами результатів при дослідженні процесу утворення двозарядних іонів при багатофотонній іонізації лужноземельних атомів в різних спектральних областях однозначно доведено, що у видимій області спектра, в основному, реалізується каскадний механізм утворення двозарядних іонів, а в інфрачервоній області - новий механізм, який пов'язаний з одночасним відривом двох електронів, і природа якого до кінця ще не з'ясована. Отримані нами

результати по двозарядних іонах стимулюють розробку нових теоретичних моделей взаємодії потужного лазерного випромінювання з атомами в яких поряд з одноелектронними рівнями є двоелектронні.

1. В. В. Суран, И.П. Запесочный. Письма в ЖТФ. 1. 973 (1975)
2. И. С. Алексахин, И. П. Запесочный, В. В. Суран. Письма в ЖЭТФ. 26. 14 (1977)
3. И. С. Алексахин, Н. Б. Делоне, И. П. Запесочный, В. В. Суран. ЖЭТФ. 76. 887 (1979).
4. Н. Б. Делоне. УФН. 115. 361 (1975)
5. N. B. Delone N.B., V. P. Krainov, V. V. Suran. Laser physics. 2. 816 (1992)
6. И. И. Бондарь, М. И. Дудич, В. В. Суран. ЖЭТФ. 1986, 90. 1952 (1986)
7. I. I. Bondar, N. B. Delone, M. I. Dudich., V. V. Suran. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 21, 2763 (1988)
8. V. V. Suran. Laser physics. 7. 660 (1997)
9. V. V. Suran. Laser physics. 7. 665 (1997)
10. V. V. Suran. Laser physics. 7. 1220 (1997)
11. Т. Т. Бернат, И. И. Бондарь, В. В. Суран. Оптика и спектроскопия. 71. 40 (1991)
12. И. И. Бондарь, В. В. Суран. ЖЭТФ. 103. 774 (1993)
13. I. I. Bondar, V. V. Suran. Laser Physics. 3. 863 (1993)
14. I. I. Bondar, V. V. Suran. Laser Physics. 9. 650 (1999)
15. И. И. Бондарь, В. В. Суран. Квантовая электроника. 28. 162 (1999)
16. И.И. Бондарь, В.В.Суран. ЖЭТФ. 113. 499 (1998)
17. I.I. Bondar, Laser physics. 7. 643 (1997)
18. И. И. Бондарь, В. В. Суран. Письма в ЖЭТФ. В. 68. 796 (1998)

DOUBLY CHARGED IONS FORMATION DURING MULTIPHOTON IONIZATION OF ALKALINE-EARTH ATOMS

V.V. Suran

Uzhgorod National University, 88000 Uzhgorod, Voloshin str. 54, Ukraine

The results on investigations of process of doubly-charged ions formation during multiphoton ionization of alkaline-earth elements in visible and infrared spectral ranges are presented. It was established that in visible spectral range step-wise mechanism of doubly-charged ions formation is realized, and in infrared spectral range - two-electron mechanism takes place.