

С.А. Тер-Аветисян

**ЗАСЕЛЕНИЕ КВАРТЕТНЫХ АВТОИОНИЗАЦИОННЫХ УРОВНЕЙ АТОМОВ ЦЕЗИЯ И РУБИДИЯ В РЕАКЦИЯХ ПЕРЕЗАРЯДКИ**

С помощью анализа временного спада интенсивностей ВУФ-линий 82,4 и 109,1 нм, соответствующих радиационным переходам с квартетных квазиметастабильных автоионизационных уровней Rb ( $4p^5 5s5p \ ^4S_{3/2}$ ) и Cs ( $5p^5 6s5d \ ^4P_{5/2}$ ) в смесях гелий – рубидий и гелий – цезий, были определены скорости реакций перезарядки метастабильных ионов рубидия и цезия на собственном атоме, приводящих к селективному заселению автоионизационных уровней атомов щелочного металла. Они оказались соответственно равны:  $\alpha$  (Rb) =  $3,76(\pm 0,6) \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с и  $\alpha$  (Cs) =  $9,94(\pm 1,5) \cdot 10^{-11}$  см<sup>3</sup>/с.

Экспериментальные исследования временных характеристик послесвечения разрядной плазмы смесей гелий–цезий и гелий–рубидий в ВУФ-области спектра с целью изучения квартетных квазиметастабильных автоионизационных состояний атомов щелочных металлов представляют большой интерес в связи с возможным применением этих металлов для создания ВУФ-лазеров [1]. Идея состоит в том, что перезарядка метастабильных ионов щелочного металла ( $A^{+*}$ ) на собственном атоме ( $A$ ) приводит к селективному заселению автоионизационных уровней атомов щелочных металлов:



где  $A^{**}$  – квартетные квазиметастабильные состояния атомов щелочного металла, которые имеют ту же четность, что и основное состояние, или слишком высокое значение момента импульса. Таким образом, правила отбора по  $J$  либо по четности запрещают электрические дипольные переходы на основное состояние. Ввиду этого распад квазиметастабильных состояний происходит в возбужденные состояния атома, что делает возможным их применение для создания ВУФ-лазеров в плазменных условиях. Реакции типа (1) с участием метастабильных ионов лития ( $Li^{+*}$ ) и натрия ( $Na^{+*}$ ) рассматривались ранее [1–3]. В таблице приведены рассмотренные реакции, их дефект энергии, длины волн основных излучательных переходов и сечения перезарядки (1).

Методика прямого измерения временных спадов интенсивностей ВУФ-линий в послесвечении разрядной плазмы [4] позволяет получать непосредственную информацию об элементарных процессах, приводящих к заселению или опустошению уровней атомов и ионов. В области длин волн 50–320 нм регистрировались временные зависимости интенсивностей резонансных линий атомов инертного газа: He (53,7 и 58,4 нм), ионов щелочных металлов Rb (71,1 и 69,7 нм), Cs (92,7 и 90,1 нм) и радиационных распадов квазиметастабильных автоионизационных состояний атомов щелочных металлов: Rb (82,4 и 82,2 нм), Cs (109,1, 119,6 и 124,7 нм) (рис. 1) – при разных концентрациях паров металлов.

Измерения проводились на спектрометрическом комплексе, подробно описанном в [4], основой которого является спектрограф ДФС-29, переоборудованный в монохроматор с рабочим диапазоном 50–320 нм и обратной линейной дисперсией 0,83 нм/мм. Стеклопаянная разрядная трубка, содержащая смесь инертного газа с парами металла, имела цилиндрический полой катод диаметром 2,5 см и длиной 30 см из мелкоячеистой сетки из нержавеющей стали и точечный анод. Концы трубки охлаждались проточной водой, а ее центральная часть, длиной 15 см, нагревалась специальной печью с системой стабилизации температуры. Концентрация атомов щелочных металлов контролировалась по температуре трубки, в которой поддерживался режим «тепловой трубы», что позволяло соблюдать достаточно однородную и стабильную концентрацию паров более 12 ч. Разрядная трубка питалась прямоугольными высокостабилизированными импульсами тока регулируемой длительностью 1 мкс и амплитудой 5,5 А. В

рабочем режиме падение напряжения на трубке составляло 400 В, скорость спада заднего фронта  $2 \cdot 10^9$  В/с. ВУФ-излучение регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-87, работающего в режиме счета фотонов, на окно которого был нанесен тонкий слой люминофора – салицилата натрия.

Образование четвертных метастабилей в реакциях перезарядки (1)

| Метастабильный ион               | Донор                            | Квартетный метастабильный уровень         | Дефект энергии, см <sup>-1</sup> | $\lambda$ , нм | Сечение, $10^{-15}$ см <sup>2</sup> |
|----------------------------------|----------------------------------|---|----------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| $\text{Li}^{+*}(1s\ 2s)^3\ S_0$  | $\text{Li}(1s^2\ 2p)^2\ P_{1/2}$ | $\text{Li}^{+*}(1s\ 2p)^2\ P_{5/2}$       | 13930                            | 21,6           | 1,0 [2], 1,2 [3]                    |
| $\text{Li}^{+*}(1s\ 2s)^1\ S_0$  | $\text{Li}(1s^2\ 2p)^2\ P_{1/2}$ | $\text{Li}^{+*}(1s\ 2s\ 2p)^4\ P_{5/2}$   | 12985                            | 22,9           | –                                   |
| $\text{Na}^{+*}3s\ 3/2\ [3/2]_0$ | $\text{Na}(2p^6\ 3s)^2\ S_{1/2}$ | $\text{Na}^{+*}(2p^5\ 3p\ 3s)^4\ D_{1/2}$ | 564                              | 39,8           | –                                   |
| $\text{Na}^{+*}3s\ 3/2\ [3/2]_2$ | $\text{Na}(2p^6\ 3s)^2\ S_{1/2}$ | $\text{Na}^{+*}(2p^5\ 3p\ 3s)^4\ S_{1/2}$ | 1139                             | 40,5           | 3,2 [2]                             |
| $\text{K}^{+*}4s\ 3/2\ [3/2]_2$  | $\text{K}(3p^6\ 4s)^2\ S_{1/2}$  | $\text{K}^{+*}(3p^5\ 4p\ 4s)^4\ S_{3/2}$  | 1081                             | 67,4           | –                                   |
| $\text{K}^{+*}4s\ 3/2\ [3/2]_2$  | $\text{K}(3p^6\ 4s)^2\ S_{1/2}$  | $\text{K}^{+*}(3p^5\ 4d\ 4s)^4\ P_{5/2}$  | 2280                             | 72,1           | –                                   |
| $\text{Rb}^{+*}5s\ 3/2\ [3/2]_2$ | $\text{Rb}(4p^6\ 5s)^2\ S_{1/2}$ | $\text{Rb}^{+*}(4p^5\ 5p\ 5s)^4\ S_{3/2}$ | 614                              | 82,4           | 1,0 *                               |
| $\text{Cs}^{+*}6s\ 3/2\ [3/2]_2$ | $\text{Cs}(5p^6\ 6s)^2\ S_{1/2}$ | $\text{Rb}^{+*}(5p^5\ 5d\ 6s)^4\ P_{5/2}$ | 1149                             | 109,1          | 3,2 *                               |

\* Результаты данной работы.

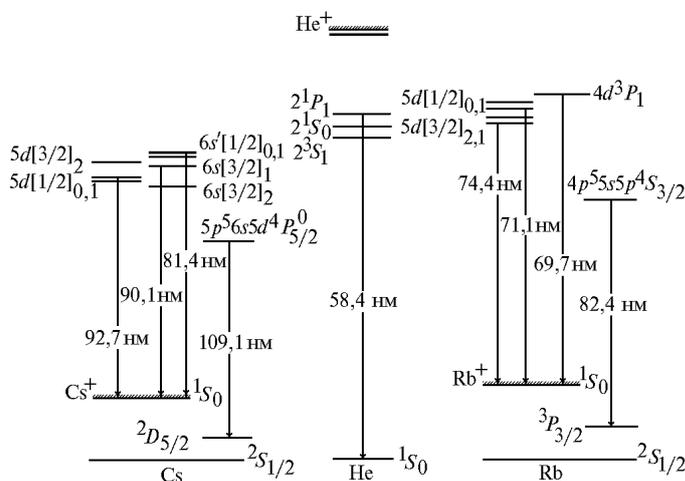


Рис. 1. Основные уровни атома гелия и ионов рубидия и цезия

Электронная система регистрации типа «старт-стоп» состояла из формирователя-дискриминатора со следящим порогом, времяамплитудного преобразователя (ВАП) и многоканального анализатора АИ-256-6, работающего в режиме амплитудного анализа с дифференциальной нелинейностью 2 %. Весь тракт позволял регистрировать импульсы с временным разрешением 0,8 нс. Линейность системы регистрации контролировалась набором статистически независимых во времени импульсов. Интенсивность послесвечения ВУФ-линий исследовалась в диапазоне длительностью до 100 мкс после обрыва импульса тока. Экспериментальные данные обрабатывались на персональном компьютере DELL 486SX.

Давление гелия поддерживалось постоянным и составляло 10 Торр. Плотность атомов рубидия и цезия  $10^{12} \div 10^{14}$  см<sup>-3</sup> определялась по температуре трубки, для чего разрядная трубка была предварительно откалибрована по методу, подробно описанному в [4], что обеспечивало погрешность определения концентраций атомов металла, не превышающую 30 %.

Исследования временных зависимостей интенсивностей ВУФ-линий 109,1 и 82,4 нм, соответствующих основным радиационным переходам с четвертных квазиметастабильных автоионизационных уровней  $\text{Rb}(4p^5\ 5s\ 5p^4\ S_{3/2})$  и  $\text{Cs}(5p^5\ 6s\ 5d^4\ P_{5/2})$  (рис. 2), показали, что они имеют длинное послесвечение, которое намного больше их времени жизни [5] и времени релаксации быстрых электронов ( $< 10^{-7}$  с<sup>-1</sup>), которые могли бы возбуждать эти уровни в послесвечении, удлиняя время их релаксации, и к тому же в гелии нет подходящих донорных уровней для столкновительной передачи энергии возбуждения на четвертные квазиметастабильные уровни атомов рубидия и цезия (см. рис. 1). В наших условиях единственно возможный канал их заселения, приводящий к таким длинным временам послесвечения, – это реакция перезарядки ме-

тастабильных ионов щелочного металла, заселенность которых велика в низкотемпературной плазме, на собственный атом типа (1) (см. таблицу):

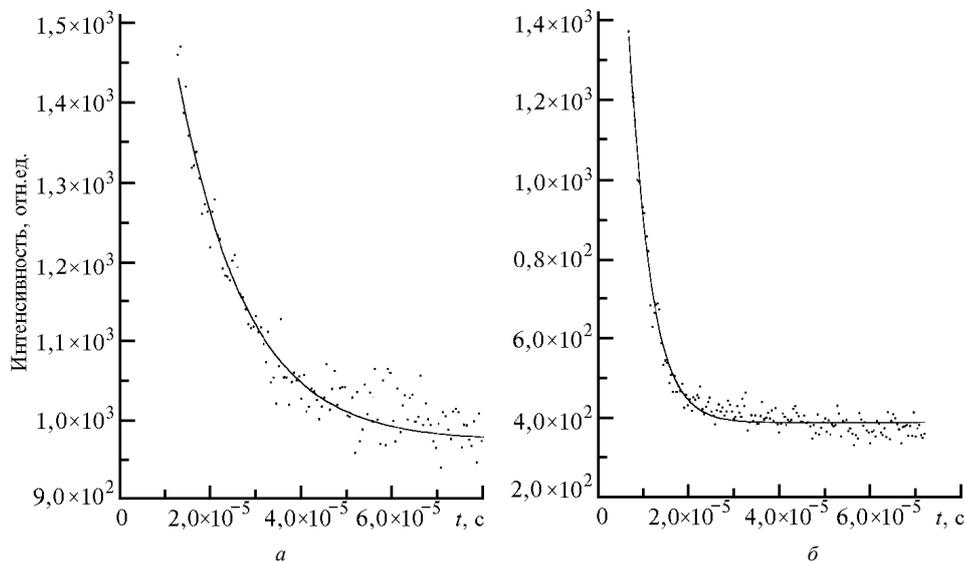
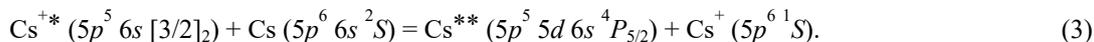
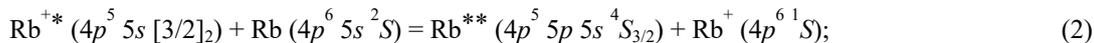


Рис. 2. Временные зависимости интенсивностей линий 109,1 (а) и 82,4 нм (б) в смесях He–Cs и He–Rb при концентрациях атомов цезия  $0,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и рубидия  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

В разрядной плазме метастабильные состояния иона щелочного металла заселяются не только электронным возбуждением и каскадными процессами, но и с помощью реакций пеннинговской ионизации с образованием возбужденных ионов, которые в смеси гелий – рубидий возможны только от резонансно-возбужденного уровня атома гелия  $\text{He}(^1P_1)$ , а в смеси гелий – цезий также от синглетного  $\text{He}(2^1S_0)$  и триплетного  $\text{He}(2^3S_0)$  метастабилей (см. рис. 1). Если два первых канала после отключения импульса тока сразу затухают (оценки показывают, что каскадное заселение в послесвечении может длиться не более 50 нс и его вклад в общее заселение не более 8%), то процессы пеннинговской ионизации длятся достаточно долго и дают основной вклад в заселенность метастабильных уровней ионов щелочного металла.

Для анализа экспериментальных результатов была рассмотрена система кинетических уравнений, которая включала уравнения для заселенностей метастабильных и резонансных состояний атома гелия, ионов щелочного металла в основном и метастабильном состояниях, квартетного квазиметастабильного состояния атомов щелочного металла. Учитывались реакции перезарядки (2), (3), автоионизационный и излучательный распады квартетных уровней, тушение метастабильного иона металла в столкновениях с медленными электронами (в основном через резонансно-возбужденный уровень иона) и образование возбужденных молекулярных ионов в тройных столкновениях, пеннинговская ионизация, образующая ионы в основном и возбужденном состояниях, излучение резонансного уровня гелия и диффузионные потери метастабилей. Решение системы балансных уравнений показывает, что скорость спада интенсивностей линий 82,4 и 109,1 нм в послесвечении имеет линейную зависимость от концентраций паров атомов металла:

$$\gamma = \gamma_0 + \alpha[M], \quad (4)$$

где  $\gamma_0$  – скорость спада всех процессов, не зависящая от концентраций атомов металла  $[M]$ ;  $\alpha$  – скорость реакции перезарядки (1). На рис. 3 приведены зависимости измеренных скоростей распадов  $\gamma$  автоионизационных уровней от концентраций атомов щелочного металла, которые достаточно хорошо описываются линейной зависимостью. Таким образом с помощью (4) можно получить значения скоростей реакций перезарядки (2), (3) для метастабильных ионов рубидия и цезия, которые соответственно равны:  $\alpha(\text{Rb}) = 3,76(\pm 0,6) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$  и  $\alpha(\text{Cs}) = 9,94(\pm 1,5) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ . В работе [6], где исследовались зависимости интенсивности ли-

нии 109,1 нм от концентрации атомов цезия в постоянном разряде, было измерено среднее сечение  $\bar{\sigma} = \langle \sigma v_a \rangle / \bar{v}_a$  реакции перезарядки (2) для метастабильных ионов цезия, которое оказалось равным  $9(\pm 3) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Подобные измерения для метастабильных ионов рубидия не были возможны из-за слабой интенсивности основной линии, излучаемой кватерным уровнем рубидия, 82,4 нм. Для наших условий, когда температура трубки  $\sim 600 \text{ К}$ , средние сечения перезарядки для метастабильных ионов цезия и рубидия будут соответственно равны:  $\bar{\sigma}(\text{Cs}) = 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$  и  $\bar{\sigma}(\text{Rb}) = 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ . Значение сечения перезарядки для ионов цезия несколько меньше, чем было получено ранее. По всей вероятности, это связано с точностью определения концентраций паров металла и с отсутствием в литературе экспериментальных данных по некоторым константам, необходимых для того метода измерений. Оценочный расчет по методу асимптотической теории столкновений в рамках модели Розена–Зинера [7] дает величину сечения  $3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  при тепловых скоростях столкновений. А в смеси гелий – рубидий измерения не были возможны, так как метастабильные ионы рубидия кроме электронного возбуждения, которое наблюдается и в смеси гелий – цезий, могут заселяться только от резонансно-возбужденных атомов гелия He ( $2^1P_1$ ) (см. рис. 1), тогда как в смеси гелий – цезий метастабильные ионы цезия заселяются и от синглетного и триплетного метастабилей гелия. К тому же сечение перезарядки метастабильных ионов рубидия более чем в три раза меньше сечения перезарядки метастабильных ионов цезия. Этого оказалось недостаточно для эффективного заселения автоионизационного уровня атома рубидия и обеспечения достаточной интенсивности, необходимой для токовых измерений.

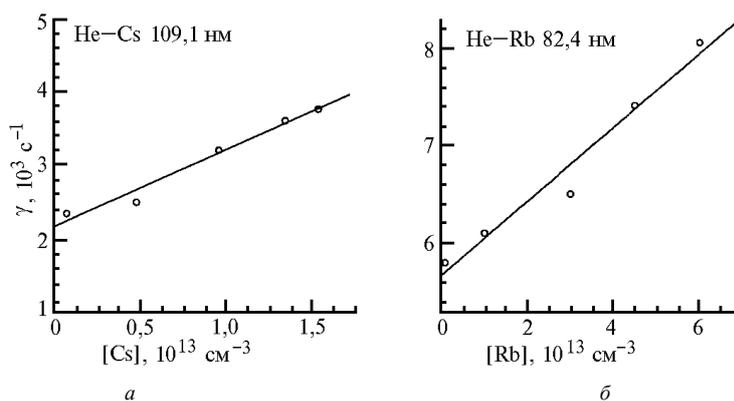


Рис. 3. Зависимости скоростей спадов интенсивностей линий 109,1 (а) и 82,4 нм (б) в смесях He–Cs и He–Rb от концентраций атомов цезия и рубидия

Таким образом, результаты работы демонстрируют эффективность применения методов ВУФ-спектроскопии послесвечения разряда для изучения элементарных процессов в низкотемпературной плазме.

Работа выполнена при финансировании из государственных централизованных источников Республики Армения в рамках научной темы с кодом 96-777.

1. Harris S.F., Young J.F. // JOSA-B. 1987. V. 4. N 4. P. 547–562.
2. Мартиросян А.Е., Папанян В.О. Элементарные процессы в атомных столкновениях. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1984. С. 108–113.
3. Ивакин И.А., Островский В.Н. // Всесоюз. конф. «Процессы ионизации с участием возбужденных атомов»: Тезисы докл. Л., 1988. С. 30–31.
4. Тер-Аветисян С.А., Папанян В.О. // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. В. 4. С. 752.
5. Тер-Аветисян С.А., Папанян В.О., Малоян А.Г. // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. В. 4. С. 567–571.
6. Ter-Avetisyan S.A., Nersisyan G.C., Papanyan V.O. // J. Russian Laser Research. 1995. V. 16. N 2. P. 145–151.
7. Смирнов Б.М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М.: Атомиздат, 1973. 294 с.

S. A. Ter-Avetisyan. **Population of the Quartet Autoionization Levels of Cesium And Rubidium Atoms in Charge Exchange Reactions.**

By means of analysis of temporal decrease of VUV lines intensities 82,4 and 109,1 nm, corresponding to radiation transitions from the Rb ( $4p^5 5s5p \ ^4S_{3/2}$ ) and Cs ( $5p^5 6s5d \ ^4P_{5/2}$ ) quasimetastable autoionizing levels, the rates of charge exchange reactions of the metastables rubidium and cesium ions on their atoms were measured in the mixtures of He-Rb and He-Cs. They turned to be equal to  $\alpha(\text{Rb}) = 3,76(\pm 0,6) \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$  and  $\alpha(\text{Cs}) = 9,94(\pm 1,5) \cdot 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ , correspondingly.