

С.А. Тер-Аветисян, В.О. Папаян

ПОСЛЕСВЕЧЕНИЕ ВУФ-ЛИНИЙ ИОНОВ ЦЕЗИЯ И РУБИДИЯ В СМЕСЯХ С ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ

Исследуется распад населенностей резонансно-возбужденных уровней ионов Rb^+ ($5s[1/2]_1$, $4d^3P_1$), Cs^+ ($5d[1/2]_1$, $6s[3/2]_1$, $6s[1/2]_1$) и атомов He (2^1P_1), Ne ($3s^1P_1$) по их ВУФ-спектрам излучения в распадающейся плазме смесей $Ne - Cs$ и $He - Rb$. Получены значения скоростей конверсии атомарных ионов неона и гелия в молекулярные в трехчастичных столкновениях в смесях $Ne - Cs$ и $He - Rb$ соответственно: $k(Ne) = 0,62 (\pm 0,2) \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$, $k(He) = 3,18 (\pm 0,8) \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$. Проведен анализ роли нерезонансной перезарядки в этих смесях. Получено значение суммарной константы скорости перезарядки в смеси $He - Rb$: $\delta = 3,88 (\pm 0,9) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$. А также в смеси $Ne - Cs$ получены значения суммарной константы скорости передачи возбуждения от близлежащих метастабилей к резонансно-возбужденным уровням ионов цезия с участием медленных электронов: $\alpha_e = 4,9 (\pm 1,6) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$ и константы скорости радиационной рекомбинации Cs^{++} : $\alpha_e^{++} = 1,45 (\pm 0,3) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$.

Как известно, в разрядной плазме смесями инертных газов с легкоионизируемым компонентом перезарядка ионов инертного газа R^+ на атомах смеси A может идти по двум разным каналам:



В случае, когда образование возбужденных атомов инертного газа R^* маловероятно (1) в связи с большим дефектом энергии, реакция (2) может быть эффективным каналом заселения возбужденных уровней иона легкоионизируемой компоненты A^{+*} . Особенно в таких смесях, как $Ne - Cs$ и $He - Rb$, где пеннинговская ионизация может привести лишь к образованию ионов щелочного металла в основном состоянии, реакция (2) является основным каналом заселения возбужденных уровней ионов цезия и рубидия в послесвечении. Хотя в смеси $He - Rb$ и возможно заселение уровней $Rb^+(5s[3/2]_{1,2})$ в реакциях пеннинговской ионизации, но от резонансно-возбужденного уровня $He(2^1P_1)$.

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию реакции перезарядки (2) в смесях $Ne - Cs$ и $He - Rb$, приводящей к заселению резонансно-возбужденных уровней щелочного металла, излучающих в ВУФ-области спектра. Исследовались распад населенностей резонансно-возбужденных уровней ионов $Rb^+(5s[1/2]_1, 4d^3P_1)$, $Cs^+(5d[1/2]_1, 6s[3/2]_1, 6s[1/2]_1)$ и атомов $He(2^1P_1)$, $Ne(3s^1P_1)$ по их ВУФ-спектрам излучения.

Возбуждение смеси атомов и исследование их послесвечения осуществлялись на экспериментальной установке, подробно описанной в [1], основой которой является спектрограф ДФС-29, переоборудованный в монохроматор, имеющий рабочий диапазон 50–320 нм. Стеклопанная разрядная трубка, содержащая смесь инертного газа с парами металла, имела цилиндрический

полый катод диаметром 25 и длиной 300 мм из мелкочаистой сетки из нержавеющей стали и точечный анод. Концы трубки охлаждались проточной водой, а ее центральная часть длиной 150 мм нагревалась специальной печью с системой стабилизации температуры. Концентрация атомов щелочных металлов контролировалась по температуре трубки. В трубке поддерживался режим «тепловой трубы», что позволяло поддерживать достаточно однородную и стабильную концентрацию паров более 12 ч. Разрядная трубка питалась прямоугольными высокостабилизированными импульсами тока с регулируемой длительностью до 10 мкс с амплитудой 5,5 А. В рабочем режиме падение напряжения на трубке составляло 400 В при скорости спада заднего фронта $2 \cdot 10^6$ В/с. ВУФ-излучение регистрировалось с помощью фотоумножителя ФЭУ-87, работающего в режиме счета фотонов. Электронная система регистрации типа «старт–стоп» состояла из формирователя-дискриминатора со следящим порогом, время амплитудного преобразователя (ВАП) и многоканального анализатора АИ-256-6, работающего в режиме амплитудного анализа. Весь тракт позволял регистрировать импульсы с временным разрешением 0,8 нс. Интенсивность послесвечения ВУФ-линий исследовалась в диапазоне длительностью до 100 мкс после обрыва импульса тока. Обработка кривых интенсивностей послесвечения производилась на персональном компьютере Dell 486SX методом наименьших квадратов.

Давление неона и гелия поддерживалось постоянным, соответственно 13 и 10 Торр. Плотность атомов рубидия и цезия, которая составляла $10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, определялась по температуре трубки, для чего разрядная трубка была предварительно откалибрована по методу, подробно описанному в [1], что обеспечивало погрешность определения концентраций атомов металла, не превышающую 30%. Концентрация электронов в послесвечении измерялась методом двух последовательных импульсов, изложенным в [2].

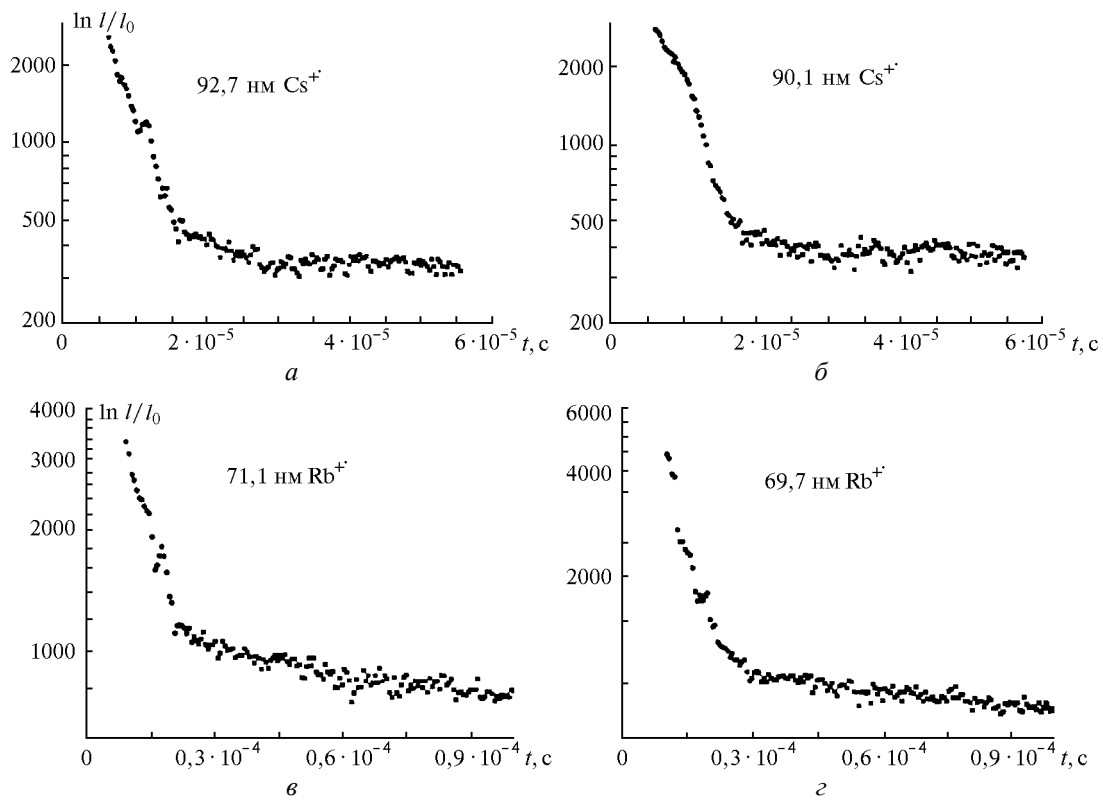


Рис. 1. Временная зависимость интенсивностей резонансных линий иона цезия 92,7 нм (*a*), 90,1 нм (*б*) и иона рубидия 71,1 нм (*в*), 69,7 нм (*г*) в послесвечении смесей Ne-Cs и He-Rb при концентрациях паров цезия $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и рубидия $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

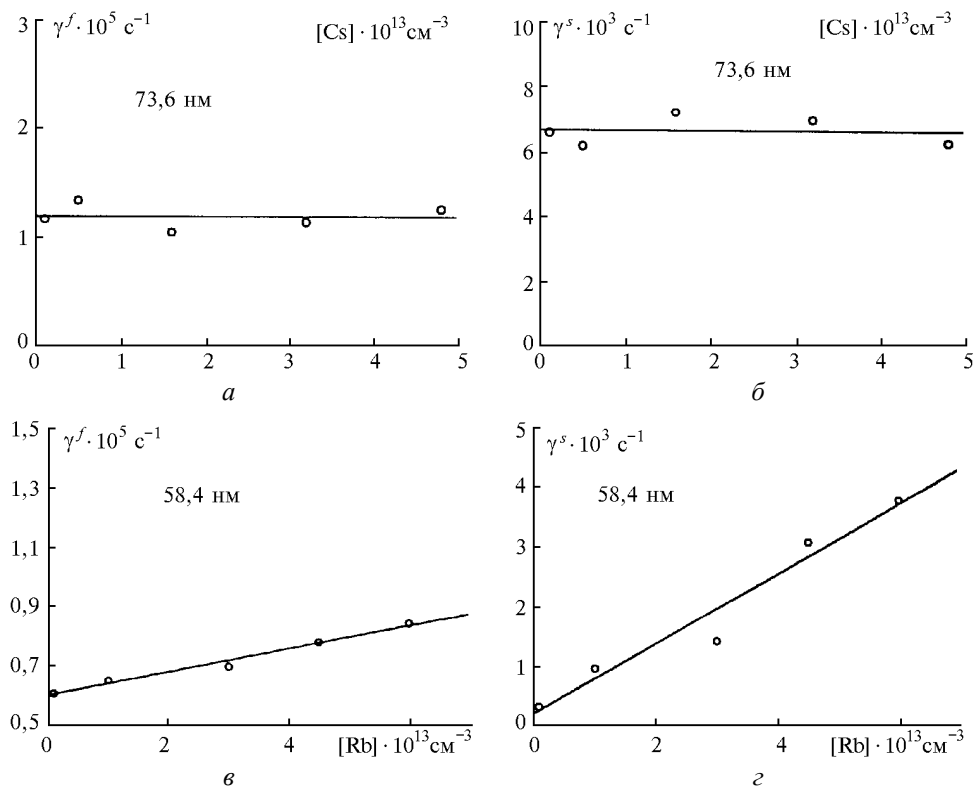


Рис. 2. Зависимость вероятностей распадов резонансных линий атомов неона 73,6 нм (*a*, *б*) и гелия 58,4 нм (*в*, *г*) в быстрой γ^f и медленной γ^s стадиях послесвечения смесей Ne-Cs и He-Rb от концентраций паров щелочного металла

Исследования яркостей ВУФ-линий ионов цезия и рубидия показали, что они имеют длинное послесвечение (рис. 1) с четко выраженными двумя стадиями распада (быстрой и медленной), которые намного больше их времени жизни [3] и времени релаксации быстрых электронов ($<10^{-7}$ с), которые могли бы возбуждать эти уровни в послесвечении, удлинняя время их релаксации. Аналогичное поведение имеют и интенсивности резонансно-возбужденных линий атомов гелия (58,4 нм) и неона (73,6 нм).

В смеси Ne–Cs резонансно-возбужденный уровень атома неона $\text{Ne}(3s^1P_1)$, излучающий линию 73,6 нм в быстрой стадии послесвечения, опустошается со скоростью $1,6(\pm 0,3) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, которая не зависит от давления паров цезия (рис. 2,а). Это соответствует времени жизни данного уровня в условиях пленения излучения [4], хотя полученное значение несколько меньше, чем значение, рассчитанное по известной формуле $\gamma^f = (0,207/\tau)(\lambda/R)^{1/2}$, где τ – естественное время жизни резонансного уровня; λ – длина волны; R – радиус разрядной трубки. Маленькое экспериментальное значение может быть связано с существованием систематической ошибки в определении значения константы. Однако в [5] было показано, что при средних давлениях (несколько Торр и ниже) предположение о полном перераспределении частоты резонансного излучения не всегда удовлетворяется и поэтому можно ожидать некоторое отклонение от теории.

Процессы деионизации плазмы, являющиеся более медленными, в послесвечении заселяют резонансно-возбужденный уровень атома неона $\text{Ne}(3s^1P_1)$, который вырождается в медленной стадии распада линии 73,6 нм. Скорость спада линии 73,6 нм должна соответствовать суммарной скорости исчезновения ионов Ne^+ в реакциях рекомбинации, происходящих в основном через образование молекулярных ионов и в реакциях перезарядки (1), (2). Вероятность перезарядки в смеси Ne–Cs мала ввиду их нерезонансного характера. Этим объясняется то обстоятельство, что скорость медленной части послесвечения линии 73,6 нм также не зависит от концентрации паров цезия (рис. 2,б) и соответствует скорости конверсии атомарных ионов неона в молекулярные в трехчастичных столкновениях: $k(\text{Ne}) = 0,62(\pm 0,2) \cdot 10^{31} \text{ см}^6/\text{с}$. Данные о значении константы скорости пеннинговской ионизации резонансно-возбужденного атома неона $3s^1P_1$ в смеси Ne–Cs в литературе не удалось найти. Однако можно утверждать, что она является более быстрым процессом (в [6] измерена константа скорости пеннинговской ионизации от метастабилей неона в смеси Ne–Cs) и в исследуемом временном интервале не существенна.

Поскольку, как уже отмечалось, в смеси Ne–Cs вероятность заселения уровней иона цезия в реакциях перезарядки мала, то на эксперименте не было замечено зависимости скорости спада интенсивностей ВУФ-линий иона цезия (92,7 и 90,1 нм) от кон-

центрации паров цезия ни в медленной, ни в быстрой стадиях послесвечения (рис. 3).

Полученные две разные скорости распада, не зависящие от концентраций паров металла, могут быть связаны только со столкновительным заселением резонансно-возбужденных уровней иона цезия от близлежащих метастабилей с помощью медленных электронов, концентрация которых в послесвечении достаточно велика (об этом будет сказано ниже) и с рекомбинационным заселением. За время ~ 30 мкс, которое соответствует длительности быстрой стадии послесвечения, интенсивности резонансных линий иона цезия 92,7 и 90,1 нм (рис. 3,а,б), спадают с одинаковой скоростью, которая составляет $\alpha_e = 4,9(\pm 1,6) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$. Это соответствует суммарной скорости передачи возбуждения от близлежащих метастабилей с участием медленных электронов.

Исследования временного спада концентрации электронов в послесвечении Ne–Cs плазмы показали, что в пределах изменения концентраций атомов цезия концентрация электронов составляет $n_e = (2 \div 1,8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и слабо зависит лишь от общего давления. Константа скорости убывающих электронов, определенная по анализу спада концентрации электронов во времени, равна $2,8(\pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$, т.е. происходит объемная рекомбинация, которая носит парный характер, так как слабо зависит от тока.

В медленной стадии послесвечения резонансно-возбужденные линии иона цезия 92,7 и 90,1 нм также имеют одинаковую скорость распада (рис. 3,б,в), что говорит о том, что у них одни и те же источники заселения. В наших условиях это может быть лишь радиационная рекомбинация одного из долгоживущих компонентов разрядной плазмы Cs^{++} с константой скорости $\alpha_e^{++} = 1,45(\pm 0,3) \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$. Ранее экспериментальные исследования ионного состава цезиевой плазмы показали [7], что в разряде, соответствующем нашим условиям, концентрация ионов Cs^+ , большинство которых является основным источником образования Cs^{++} , по сравнению с концентрацией Cs_2^+ , в то время как ионы Cs_2^+ доминируют, когда $n_e < 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Согласно [8] $\text{Cs}_2^+/\text{Cs}^+$ возрастает, когда уменьшается n_e .

В смеси Ne–Rb кинетика резонансно-возбужденного уровня $\text{He}(2^1P_1)$ исследовалась по временной зависимости интенсивности линии 58,4 нм. Время пеннинговской ионизации, опустошающей этот уровень, составляет всего несколько микросекунд [9]. Решение системы кинетических уравнений (аналогично [1]) показало, что в быстрой стадии послесвечения (до 30 мкс) интенсивность резонансно-возбужденной линии 58,4 нм должна спадать со скоростью

$$\gamma^f = k [\text{He}]^2 + \delta [\text{Rb}], \quad (3)$$

где в квадратных скобках приведены соответствующие концентрации; k – скорость конверсии атомарных ионов гелия в молекулярные, концентрация которых, в

наших условиях, по крайней мере на порядок больше, чем $[Rb^+]$ [10]; δ – суммарная константа реакций перезарядки (1), (2). На рис. 2,в приведены вероятности γ^f в быстрой стадии послесвечения (до 30 мкс) при разных концентрациях рубидия, которые достаточно хорошо описываются линейной зависимостью. Определенное методом наименьших квадратов значе-

ние суммарной константы скорости перезарядки $\delta = 3,88(\pm 0,9) \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$, оно хорошо согласуется с известным значением [10], а скорость конверсии атомарных ионов гелия в молекулярные в смеси He–Rb, составляет: $k(\text{He}) = 3,18(\pm 0,8) \cdot 10^{-31} \text{ см}^6/\text{с}$. Медленная часть распада линии 58,4 нм (рис. 2,з) достаточно хорошо исследована в [11].

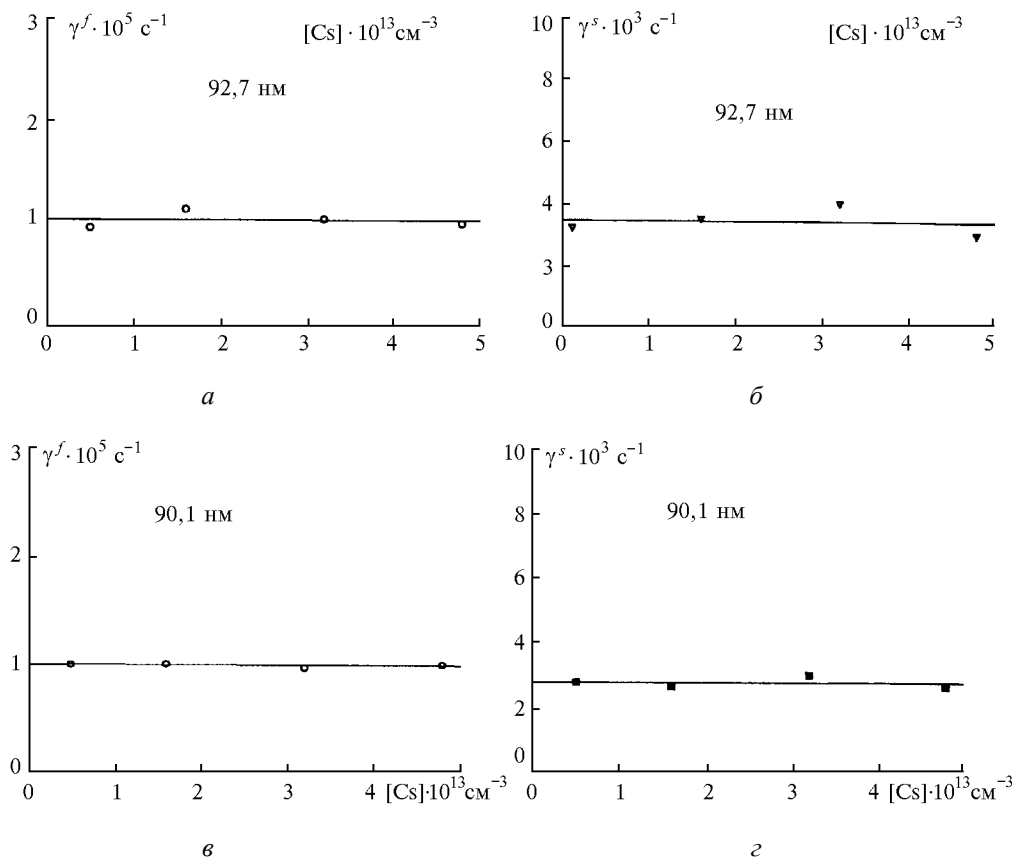


Рис. 3. Зависимость вероятностей распадов резонансных линий иона цезия 92,7 нм (а, б) и 90,1 нм (в, з) в быстрой γ^f и медленной γ^s стадиях послесвечения смеси Ne–Cs от концентрации паров цезия

Исследования послесвечения резонансно-возбужденных уровней иона рубидия $5s[1/2]_1$ и $4d^3P_1$, излучающих линии соответственно 71,1 и 69,7 нм (рис. 1,в,з) в смеси He–Rb, показали, что в быстрой и в медленной стадиях распадов интенсивности ВУФ-линий спадают с одинаковыми скоростями, так как у них одинаковые каналы возбуждения. В быстрой стадии послесвечения линейная зависимость вероятности опустошения этих уровней от концентраций паров рубидия (рис. 4,а,в) может быть вызвана только рекомбинацией ионов Rb^{++} через образования молекулярных ионов в двухчастичных столкновениях (трехчастичные столкновения будут существенными при более высоких концентрациях атомов рубидия), диссоциативная рекомбинация которых заселяет резонансно-возбужденные уровни иона рубидия. Вклад перезарядки (2) не превышает 0,1% от полного сечения [10]. Фитирование эксперименталь-

ных значений скорости спада интенсивностей в зависимости от концентрации паров рубидия по линейному закону дает значение константы скорости образования молекулярных ионов рубидия в двухчастичных столкновениях: $\alpha(Rb) = 1,0(\pm 0,3) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$. Заселенности резонансно-возбужденных уровней иона рубидия $5s[1/2]_1$ и $4d^3P_1$ в медленной стадии распада (рис. 4,б,з) имеют скорость, равную скорости медленной стадии распада резонансно-возбужденного атома гелия $\text{He}(2^1P_1)$ (см. рис. 2,з). Т.е. при медленном рекомбинационном заселении резонансного уровня атома гелия происходит некоторая перекачка возбуждения на уровни иона рубидия в реакциях перезарядки.

Таким образом, для получения общей картины распределения энергии в послесвечении плазмы смесей инертных газов с щелочными металлами метод ВУФ-спектроскопии оказался чрезвычайно удобным.

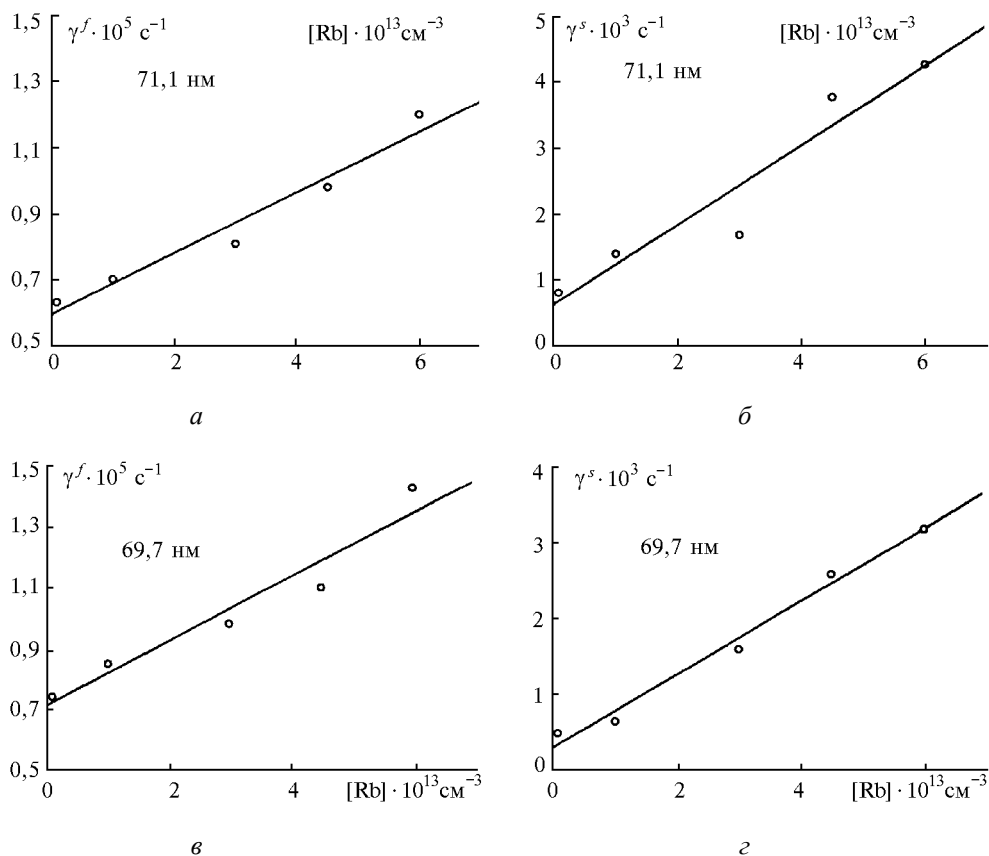


Рис. 4. Зависимость вероятностей распадов резонансных линий иона рубидия 71,1 нм (а, б) и 69,7 нм (в, г) в быстрой γ^f и медленной γ^s стадиях послесвечения смеси He–Rb от концентрации паров рубидия

Работа выполнена при финансировании из государственных централизованных источников Республики Армения в рамках научной темы с кодом 96-777 и фонда SRDF SGP, грант № АЕ 2-327.

1. Тер-Аветисян С.А., Папаян В.О. // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. В. 4. С. 752–756.
2. Герасимов Г.Н., Лягущенко Р.И., Старцев Г.П. // Оптика и спектроскопия. 1971. Т. 30. В. 4. С. 606–611.
3. Тер-Аветисян С.А., Папаян В.О., Малоян А.Г. // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. В. 4. С. 567–571.
4. Биберман Л.М. // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. В. 5. С. 416–426; 1949. Т. 19. В. 7. С. 584–590. Holstein T. // Phys. Rev. 1947. V. 72. N 12.

5. Payne M.G., Talmadge J.E., Hurst G.S., Wagner E.B. // Phys. Rev. A. 1974. V. 9. N 3. P. 1050–1069.
6. Фогель Д., Толмачев Ю.А. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 49. В. 4. С. 824–825.
7. Sayer B., Jeannot J.C., Lozingot J., Berlande J. // Phys. Rev. A. 1973. V. 8. N 6. P. 3012–3020.
8. Моргулис Н.Д., Корчевой Ю.П. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8. В. 6. С. 313–316.
9. Толмачев Ю.А. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. В. 4. С. 750–757.
10. Фогель Д., Толмачев Ю.А. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 49. В. 4. С. 825–828.
11. Deloche R., Mouchicourt P., Lambert F. // Phys. Rev. 1976. V. 13. N 3. P. 1140–1176.

Институт физических исследований НАН Армении,
Ереван

Поступила в редакцию
9 октября 1997 г.

S.A. Ter-Avetisyan, V.O. Papayan. Afterglow of VUV lines of Cesium and Rubidium Ions in Mixtures with Rare Gases.

Investigation were carried out of decrease of populations of resonantly excited levels of ions $\text{Rb}^+(5s[1/2]_1, 4d^3P_1)$, $\text{Cs}^+(5d[1/2]_1, 6s[3/2]_1, 6s[1/2]_1)$ and atoms He (2^1P_1), Ne ($3 s^1P_1$), by their VUV radiation spectra in the decay plasma. The rate of atomic neon and helium ions conversion into molecular ions in the three body collisions were measured: $k(\text{Ne})=0.62(\pm 0.2) \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$, $k(\text{He})=3.18(\pm 0.8) \cdot 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$, correspondingly. The analysis of role of nonresonant charge – exchange reactions was carried out in these mixtures. In the He–Rb mixture the constant of summary rate of charge – exchange reaction has been received: $\delta = 3.88 (\pm 0.9) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$. The constant of summary rate transfer excitation from nearliving metastables to the resonantly excited levels of cesium ions with slow electrons: $\alpha_e = 4.9 (\pm 1.6) \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$, and constant of radiation recombination of Cs^{++} : $\alpha_{e^{++}} = 1.45 (\pm 0.3) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$, were also measured.