

предела  $\bar{b}$ ,  $U_i$  найдены с точностью, намного превосходящей точность измерения отдельного распределения  $b^{(k)}(x)$ , и к ним можно применять «слоистые» алгоритмы преобразования с большим числом слоев. Кроме того, облегчается физическая интерпретация эксперимента в целом, так как коэффициенты разложения  $C_i$  «автоматически» осуществляют классификацию результатов [13].

Предлагаемая схема применена к анализу возможностей автоматизированного спектроскопического комплекса [15], разработанного в лаборатории газовой электроники Петрозаводского университета.

Описание схемы установки, детальное изложение методов получения и обработки результатов и их обсуждение готовится к публикации.

### Литература

- [1] Г. Грим. Спектроскопия плазмы. Атомиздат, М., 1969.
- [2] Методы исследования плазмы (под ред. В. Лохте-Хольтгревена). «Мир», 1971.
- [3] Г. А. Колобова. Изв. вузов, физика, 75, 1967.
- [4] С. И. Крылова, Л. А. Луизова, А. Д. Хахаев. Опт. и спектр., 37, 1037, 1971.
- [5] В. Ф. Турчин, В. П. Козлов, М. С. Малкевич. Усп. физ. наук, 102, 345, 1970.
- [6] К. Ф. Кноспе, К. Deitrich. Beitr. Plasmaphys., 7, 299, 1967.
- [7] Е. Л. Косарев. Ж. вычисл. математики и математич. физики, 13, 1591, 1973.
- [8] R. A. Keller. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Phenomena in Ionised Gases, 395. Oxford, 1971.
- [9] Л. А. Луизова. Опт. и спектр., 38, 639, 1975.
- [10] В. П. Козлов. Автореф. канд. дисс., Л., 1966.
- [11] Ю. В. Линник. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. Физматгиз, М., 1962.
- [12] Г. М. Букат, В. А. Губкевич, Е. А. Ершов-Павлов, Л. И. Киселевский, И. П. Савик, Н. И. Чубрик, В. Д. Шиманович. Ж. прикл. спектр., 22, 403, 1975.
- [13] Т. Андерсон. Введение в многомерный статистический анализ. Физматгиз, М., 1963.
- [14] К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, В. П. Козлов, А. Г. Покровский. Изв. АН СССР, физика атмосферы и океана, 10, 1041, 1974.
- [15] И. И. Кюльмясу, А. Д. Хахаев. Исследование пространственно-неоднородной плазмы по контурам спектральных линий. Межвузовский сборн. Изд. ПГУ, 1977.
- [16] C. L. Mateer. J. Atmos. Sci., 22, 370, 1965.

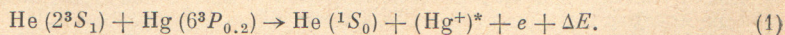
Поступило в Редакцию 26 октября 1976 г.

УДК 539.186+546.49+546.291

## НЕУПРУГИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ И РТУТИ

В. А. Картазаев, Ю. А. Пиотровский и Ю. А. Толмачев

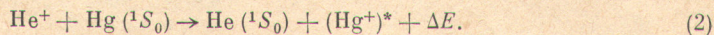
Ряд уровней иона ртути с энергией возбуждения 23.86 и 24.31 эВ заселяется при разряде постоянного тока в смеси He—Hg значительно эффективнее, чем при разряде в чистой ртути [1]. Одним из возможных механизмов такого селективного возбуждения являются неупругие столкновения метастабильных атомов гелия и ртути



Этот процесс аналогичен реакции Пеннинга с тем лишь различием, что обе частицы в исходном состоянии обладают потенциальной энергией возбуждения. Столкновения типа реакции (1) для других пар возбужденных атомов исследовались ранее [2-4] различными методами. Константы скорости подобных процессов достигают величины порядка  $10^{-9} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ . Вероятность подобных столкновений в условиях газоразрядной плазмы оказывается, как правило, малой по сравнению с вероятностями других процессов тушения метастабильных атомов. В связи с этим одним из наиболее удобных методов наблюдения неупругих соударений двух возбужденных частиц оказывается изучение послесвечения.

Реакция (1) изучалась нами в послесвечении импульсного разряда в смеси гелий—ртуть. Разрядная трубка имела диаметр 20 мм, длина исследуемой части положительного столба составляла 200 мм. Давление гелия изменялось в диапазоне 2–6 тор, давление ртути —  $(0.5–5) \cdot 10^{-4}$  тор. Сила разрядного тока в импульсе не превышала 200 мА, длительность импульса варьировалась от 20 до 200 мкс. Регистрация излучения осуществлялась методом счета фотонов.

Разрешающая способность по времени могла изменяться от 4 до 32 мкс. Концентрация метастабильных атомов измерялась по поглощению линий от вспомогательного источника, концентрация высоковозбужденных состояний — по абсолютной яркости соответствующих линий. Исследования показали, что линии Hg II обладают длительным послесвечением с характерным временем затухания порядка сотен мкс. Такое длительное послесвечение в условиях нашего эксперимента может быть вызвано либо заселением урневной  $Hg^+$  в ходе реакции (1), либо при нерезонансной перезарядке



В наших условиях эффективное время жизни метастабильных атомов гелия и иона  $He^+$  в послесвечении определяется главным образом неупругими столкновениями

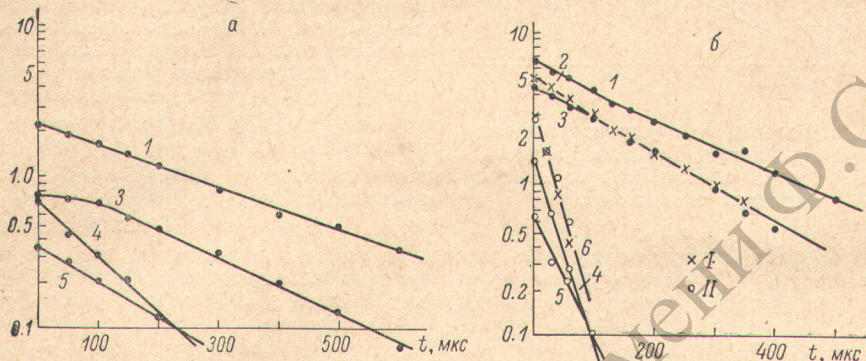
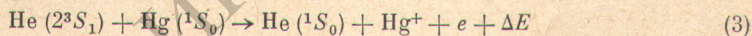


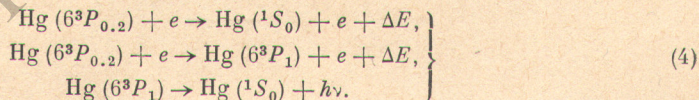
Рис. 1. Изменение заселенности уровней в послесвечении разряда в смеси He—Hg при  $P_{He} = 6$  тор,  $N(Hg) = 1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau_{имп.} = 100$  мкс и токе в импульсе  $I = 5$  (а) и 40 мА (б).

1 — заселенность метастабильного уровня  $He(2^3S_1)$  ( $[He(2^3S_1)] \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-3}$ ), 2 — яркость линии  $\lambda = 794.5$  нм (пр. ед.), 3 — яркость линии  $\lambda = 615.0$  нм (пр. ед.), 4 — заселенность метастабильного уровня  $Hg(6^3P_2)$  ( $[Hg(6^3P_2)] \cdot 2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-3}$ ), 5 — заселенность метастабильного уровня  $Hg(6^3P_0)$  ( $[Hg(6^3P_0)] \cdot 1.3 \cdot 10^{-10} \text{ см}^{-3}$ ), 6: I — произведение концентрации метастабильных атомов  $He(2^3S_1)$  и  $Hg(6^3P_2)$ , II — разность кривых 2 и 3.

их с нормальными атомами ртути. Поскольку эффективные сечения реакции (2) и тушения метастабильных атомов гелия в результате реакции Пеннинга



близки [5, 6],  $\tau_{эфф.}$  состояний  $He^+$  и  $He(2^3S_1)$  отличаются незначительно. Для того чтобы однозначно разделить влияние реакций (1) и (2), нами была использована зависимость  $\tau_{эфф.}$  ( $Hg(6^3P_{0,2})$ ) от концентрации электронов [7]. Тушение уровней  $6^3P_{0,2}$  ртути происходит вследствие столкновений



Увеличение силы разрядного тока в импульсе приводило к уменьшению времени жизни метастабильных атомов ртути. В то же время скорость спада яркости линий Hg II  $\lambda = 615.0$  нм ( $7^2P_{3/2} - 7^2S'_{1/2}$ ) и  $\lambda = 794.5$  нм ( $7^2P_{1/2} - 7^2S'_{1/2}$ ) при  $t > 100$  мкс оставалась прежней (рис. 1). Отсюда можно сделать вывод о том, что в дальнейшем послесвечении уровни  $Hg^+(7^2P_{1/2,3/2})$  заселяются преимущественно в результате нерезонансной перезарядки.

В раннем послесвечении наблюдается заметное различие зависимости заселенности этих уровней от времени. Яркость линии  $\lambda = 794.5$  нм спадает существенно скорее, чем яркость линии  $\lambda = 615.0$  нм. Анализ возможных процессов возбуждения уровня  $7^2P_{1/2}$  показал, что единственным процессом, который может объяснить такую зависимость, может быть реакция столкновения метастабильных атомов гелия и ртути. При этом приходится предположить, что состояние  $7^2P_{3/2}$  в ходе реакции (1) не заселяется. Измерив отношение заселенностей уровней  $7^2P_{1/2}$  и  $7^2P_{3/2}$ , можно определить эффективную скорость затухания процесса, приводящего к дополнительному заселению уровня  $7^2P_{1/2}$  (рис. 1). Совпадение этой величины со скоростью изменения

произведения концентраций метастабильных атомов гелия и ртути подтверждает такое предположение. По абсолютной яркости линии  $\lambda=794.5$  нм была определена константа скорости реакции (1)  $\langle \sigma v \rangle_1 = (1.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-9}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, соответствующая эффективному сечению столкновения  $\sigma_1 = 1.2 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>.

Отметим, что регистрация реакции столкновения двух метастабильных атомов оказалась возможной только в узком диапазоне давлений компонент смеси и силы разрядного тока. Обусловлено это тем, что увеличение концентрации атомов ртути приводит к быстрому уменьшению концентрации метастабильных атомов гелия вследствие реакции Пеннинга (3) и снижению электронной температуры в импульсе. В то же время при увеличении силы разрядного тока возрастает вероятность тушения метастабильных атомов ртути электронами.

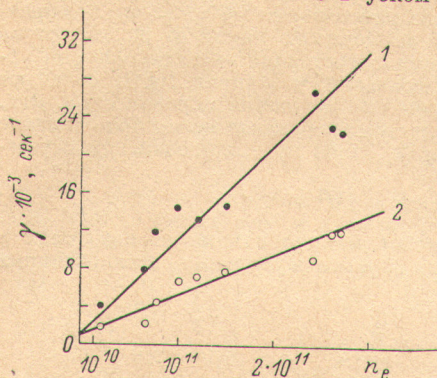


Рис. 2. Зависимость вероятности разрушения метастабильных атомов  $\text{Hg}(6^3P_2)$  и (1) и  $\text{Hg}(6^3P_0)$  от концентрации электронов.

В ходе эксперимента нами были определены также эффективные сечения столкновений атомов  $\text{Hg}(6^3P_{0,2})$  с медленными электронами. Измерялась зависимость вероятности тушения метастабильных атомов ртути от концентрации электронов. Величина  $n_e$  определялась методом зондирующего импульса [8]. На рис. 2 показана полученная зависимость  $\gamma = 1/\tau_{\text{эфф}}$  от  $n_e$ . Найденные по наклону прямых значения констант равны:  $\langle \sigma v \rangle_{\text{э}P_2} = (10 \pm 4) \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>,  $\langle \sigma v \rangle_{\text{э}P_0} = (5 \pm 2) \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Электронная

температура в послесвечении была рассчитана на основе методики, предложенной в работе [9], и приведенные значения констант соответствуют  $T_e = 500 \div 1500$  К. Величина  $\langle \sigma v \rangle$ , определенная в нашем опыте, близка к результатам работ [10, 11].

#### Литература

- [1] D. J. Dyson. Nature, 207, 361, 1965; N. Susuki. Japan J. Appl. Phys., 4, 442, 1965.
- [2] B. J. Garrison, W. H. Miller, H. F. Schuefer. J. Chem. Phys., 59, 3193, 1973.
- [3] O. Vochkova, S. Frish, Yu. Tolmachev. Opt. Commun., 7, 423, 1973.
- [4] О. П. Бочкова, Ю. А. Толмачев. Опт. и спектр., 33, 183, 1972.
- [5] H. Капо, Т. Шау, Г. Дж. Коллинс. Appl. Phys. Lett., 27, 610, 1975.
- [6] В. С. Алейников. Опт. и спектр., 22, 31, 1970.
- [7] Н. П. Пенкин, Т. П. Редько. Опт. и спектр., 36, 446, 1974.
- [8] Г. Н. Герасимов, Р. И. Лягущенко, Г. П. Старцев. Опт. и спектр., 30, 606, 1971.
- [9] А. Б. Благоев, Ю. М. Каган, Н. Б. Колоколов, Р. И. Лягущенко. ЖТФ, 44, 339, 1974.

Поступило в Редакцию 17 декабря 1976 г.

УДК 539.194

#### ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

А. А. Беляева, М. И. Дворкин и Л. Д. Щерба

В работе [1] была допущена ошибка при выводе аналитического выражения (6) для расчета частот деформационных М—О-колебаний  $\nu_{1E}$  и  $\nu_{2E}$  молекул  $\text{M}_2\text{SO}_4$  симметрии  $D_{2d}$ .

В рамках приближений, введенных в [1], исправленное выражение (6) выглядит следующим образом:

$$\nu_{1E, 2E}^2 = 16.976 \frac{A(K_\varphi + K_\delta) \pm \sqrt{A^2(K_\varphi + K_\delta)^2 - 4(A^2 - B^2)K_\varphi K_\delta}}{2M_M^2 r_0^2}, \quad (1)$$

где все обозначения, размерности и значения силовых констант  $K_\varphi$ ,  $K_\delta$  — согласно [1].