

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ 6³P₁- и 6³P₀-УРОВНЕЙ РТУТИ В СМЕСИ ПАРОВ НАТРИЙ—РТУТЬ

И. П. Богданова и В. Д. Марусин

Использовано явление передачи энергии возбуждения от атомов ртути к атомам натрия для изучения формы функций возбуждения 6³P₁- и 6³P₀-уровней ртути при возбуждении смеси Na—Hg электронным пучком. Определено также абсолютное эффективное сечение электронного возбуждения метастабильного уровня ртути 6³P₀ $Q = (5 \pm 3) \times 10^{-18}$ см² (при энергии электронов 15 эв).

Передача возбуждения от атомов ртути к атомам натрия изучалась как при сенсibilизированной флуоресценции смеси паров натрий—ртуть, так и в разряде [1-4].

В настоящей работе это явление передачи энергии возбуждения от ртути к натрию было использовано для изучения формы функций возбуждения 6³P₁- и 6³P₀-уровней ртути. Смесь паров возбуждалась пучком электронов. Установка и конструкция трубки возбуждения описана в работе [5]. Диаметр пучка электронов был равен 4 мм, энергия электронов изменялась от 2 до 15 эв. Ток в пучке не превышал 50 мка. Разброс электронов по энергиям был $\div 0.4$ эв. Трубка возбуждения имела два отростка, в которые соответственно закладывались запаянные ампулы с натрием и ртутью. Сама трубка и отростки помещались в печи, температура которых могла изменяться независимым образом. Печь, в которой находилась трубка возбуждения, поддерживалась при температуре 300° С.

Измерения производились следующим образом. Сначала вскрывалась ампула с натрием и производилась запись спектра натрия при фиксированной энергии электронов и температуре печи с отростком с натрием, а также форма функций возбуждения отдельных спектральных линий натрия до энергий электронов 15 эв. Удалось произвести запись функций возбуждения отдельных компонент дублетной структуры, но заметного различия в форме не было обнаружено. Затем вскрывалась ампула со ртутью и вновь при тех же температурах в основной печи и в печи отростка с натрием и той же энергии электронов производилась запись спектра.

При этом можно было считать, что концентрация атомов натрия оставалась неизменной, а концентрация атомов ртути изменялась. Относительная концентрация атомов ртути определялась по отношению интенсивностей спектральных линий натрия и ртути. Действительно, если работать в условиях однократных столкновений, что определяется линейной зависимостью интенсивностей спектральных линий от давления паров и тока в пучке, то интенсивности неусиливаемых спектральных линий будут определяться соотношением

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{Na}} &= N_{0\text{Na}} n_e v_e Q_{\text{Na}} \\ I_{\text{Hg}} &= N_{0\text{Hg}} n_e v_e Q_{\text{Hg}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Откуда

$$\frac{N_{0\text{Hg}}}{N_{0\text{Na}}} = \frac{I_{\text{Hg}}}{I_{\text{Na}}} \frac{Q_{\text{Na}}}{Q_{\text{Hg}}}, \quad (2)$$

т. е. относительную концентрацию атомов ртути можно определить по относительной интенсивности спектральных линий ртути и натрия, если известны эффективные сечения их возбуждения Q_{Hg} и Q_{Na} .

В качестве линий сравнения были выбраны спектральные линии натрия 568.8 нм и ртути 546.1 нм. Спектральная линия натрия 568.8 нм, как показывают измерения (табл. 1), не усиливается в присутствии паров ртути. Не изменяет заметно своей интенсивности также и резонансный дублет натрия 589.0/9.6 нм, так как добавка в заселении за счет каскада с усиленных уровней 9S и 7S мала по сравнению с электронным возбуждением уровня 3P. Эффективные сечения выбранных в качестве сравнения спектральных линий известны; они равны при энергии электронов 15 эВ соответственно [6]

$$Q_{\text{Na}} = 25 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2 (\lambda \text{ 568.8 нм}),$$

$$Q_{\text{Hg}} = 5.3 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2 (\lambda \text{ 546.1 нм}).$$

Таблица 1

λ , нм	Переход	ΔE , эВ		$\frac{I + \Delta I}{I}$			
		6^3P_0	6^3P_1	$N_{0\text{Hg}}/N_{0\text{Na}} = 2.4$	$N_{0\text{Hg}}/N_{0\text{Na}} = 26$	$N_{0\text{Hg}}/N_{0\text{Na}} = 61$	$N_{0\text{Hg}}/N_{0\text{Na}} = 105$
616.1	3P—5S	+0.548	+0.766	1.0	1.1	1.2	1.6
589.6	3S—3P	+2.551	+2.769	1.0	1.0	1.0	1.0
568.8	3P—4D	+0.382	+0.600	1.0	1.0	1.0	1.0
515.3	3P—6S	+0.157	+0.375	1.0	1.6	2.2	—
498.3	3P—5D	+0.075	+0.293	0.9	0.9	0.9	1.1
475.2	3P—7S	—0.046	+0.172	1.9	14	27	45
454.5	3P—8S	—0.164	+0.054	0.9	1.0	1.3	2.1
449.8	3P—7D	—0.192	+0.026	0.9	0.9	1.3	2.4
442.3	3P—9S	—0.239	—0.021	1.0	3.1	7.1	12.7
439.3	3P—8D	—0.258	—0.040	1.0	1.2	1.9	—
432.5	3P—9D	—0.302	—0.084	—	0.8	0.9	1.3

Тогда

$$\frac{N_{0\text{Hg}}}{N_{0\text{Na}}} = 4.8 \frac{I_{\text{Hg}}}{I_{\text{Na}}}. \quad (3)$$

Измерения отношения интенсивностей спектральных линий проводились с точностью 5—7%.

Усиление спектральных линий натрия при увеличении концентрации паров ртути измерялось при изменении отношения интенсивностей линий сравнения $I_{\text{Hg}}/I_{\text{Na}}$ от 0.5 до 22. Как видно из рис. 1, в этой области усиление спектральных линий натрия линейно зависит от изменения отношения $I_{\text{Hg}}/I_{\text{Na}}$.

В спектре натрия наблюдение велось на резонансном дублете 589.6/9.0 нм (3S—3P), на дублетах резкой серии с $n=6-9$ и на дублетах диффузной серии с $n=4-8$. Полученные величины усиления спектральных линий натрия приведены в табл. 1 в зависимости от отношения концентраций атомов ртути и натрия, подсчитанного из соотношения (3).

Наибольшее усиление наблюдается на дублете 475.2/4.8 нм. Верхний уровень этого дублета 7^2S , как видно из табл. 1, находится в резонансе с метастабильным уровнем ртути 6^3P_0 . Большое усиление наблюдается также на дублете 442.3/2.0 нм с верхним уровнем 9^2S , находящимся в резонансе с 6^3P_1 -уровнем ртути. Поэтому если измерить величину усиления

спектральных линий натрия 475.2 и λ 442.3 нм в зависимости от энергии электронов, то можно определить форму функций возбуждения уровней 6^3P_0 и 6^3P_1 ртути. Результаты таких измерений приведены на рис. 2. Большого различия в форме функций возбуждения двух подуровней у ртути, как видно, не наблюдается. Обращает на себя внимание тот факт, что основной максимум функции возбуждения уровня 6^3P_0 несколько шире, чем у уровня 6^3P_1 .

Форма функции возбуждения уровня 6^3P_1 ртути может быть определена не только через передачу энергии возбуждения ударами 2-го рода атомам натрия, но и непосредственным измерением излучения с этого уровня ртути спектральной линии 253.7 нм. Сопоставление результатов определения формы функции возбуждения уровня ртути 6^3P_1 по усилению спектральной линии натрия 442.3/2.0 нм и по регистрации излучения 253.7 нм ртути приведено на рис. 3. Как видно, наблюдается хорошее согласие двух способов определения. Таким образом, на основе этих измерений можно утверждать, что усиление линии натрия 442.3/2.0 нм действительно обусловлено передачей энергии возбуждения от уровня 6^3P_1 ртути уровню 9^2S натрия.

Из табл. 1 видно, что усиление наблюдается также на дублете натрия с верхним уровнем 6^2S (λ 515.3 нм), который расположен на 0.16 эв ниже, чем метастабильный уровень ртути 6^3P_0 . Запись же формы функции возбуждения усиленной линии натрия 515.3 нм совпадает с полученной на линии 475.3 нм (рис. 2, кривая 3).

Анализ табл. 1 показывает, что, за исключением уровня 6^2S , для которого трудно говорить об энергетическом резонансе с уровнями ртути, увеличение заселенности всех остальных уровней натрия соответствует условию резонанса. При этом увеличивается заселенность уровней, расположенных преимущественно выше, чем передающий уровень ртути.

Как было показано ранее [6], абсолютную величину эффективного сечения электронного возбуждения уровней 6^3P_1 и 6^3P_0 ртути можно рассчитать из соотношения

$$Q_{e6^3P_1} = \left(\frac{\Delta I + I}{I} \right)_{442.3} \frac{Q_{e9^2S}}{N_{\text{Hg}} \nu Q_{6^3P_1}^{II} \tau_{6^3P_1}}, \quad (4)$$

$$\frac{Q_{e6^3P_1}}{Q_{e6^3P_0}} = \frac{\left(\frac{I + \Delta I}{I} \right)_{442.3}}{\left(\frac{I + \Delta I}{I} \right)_{475.3}} \frac{Q_{e9^2S} Q_{6^3P_0}^{II} \tau_{6^3P_0}}{Q_{e7^2S} Q_{6^3P_1}^{II} \tau_{6^3P_1}}, \quad (5)$$

где N_{Hg} — концентрация нормальных атомов ртути; ν — относительная скорость атомов; $Q_{e6^3P_1}$, $Q_{e6^3P_0}$ — эффективные сечения электронного возбуждения 6^3P_1 - и 6^3P_0 -уровней ртути; $Q_{6^3P_1}^{II}$, $Q_{6^3P_0}^{II}$ — эффективные сечения ударов 2-го рода; $\tau_{6^3P_1}$, $\tau_{6^3P_0}$ — время жизни соответствующих возбужденных состояний ртути; Q_{e7^2S} , Q_{e9^2S} — эффективные сечения электронного возбуждения соответствующих уровней натрия.

Для расчета необходима величина концентрации нормальных атомов ртути N_{Hg} . Эта величина определялась по измерению абсолютной яркости спектральной линии ртути 546.1 нм путем сравнения ее яркости с излучением ленточной лампы с вольфрамовой полоской.

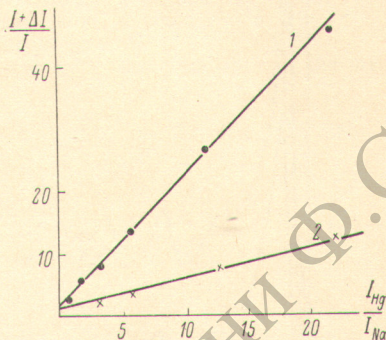


Рис. 1. Зависимость относительного усиления спектральных линий натрия от относительной концентрации атомов ртути.

1 — λ 475.1; 2 — 442.3 нм.

Расчет концентрации производился на основе соотношения (1). Величина эффективного сечения электронного возбуждения, использованная при расчете, приведена выше. Для контроля была определена абсолютная яркость спектральной линии ртути 567.6 нм и также рассчитана концентрация нормальных атомов. Разброс значений не превысил 25%. Итак, все измерения усиления линий натрия проводились в интервале концентраций атомов ртути $1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ — $6.0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Продолжительность жизни 6^3P_1 -состояния ртути определялась методом задержанных совпадений по послесвечению усиленной спектральной линии натрия 442.3 нм в присутствии паров ртути и по послесвечению спектральной линии ртути 253.7 нм, что дало совпадающие значения.

Время жизни метастабильного состояния 6^3P_0 ртути измерялось по послесвечению усиленной линии натрия

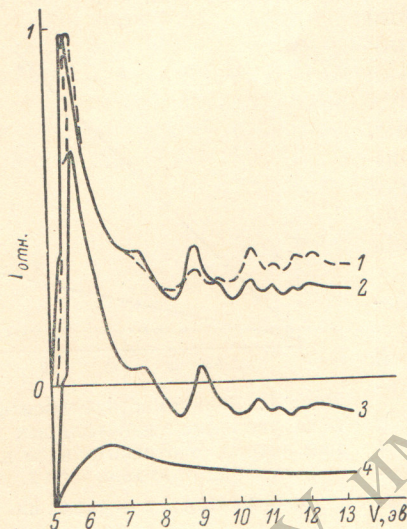


Рис. 2. Форма функций возбуждения.

1 — 6^3P_1 -уровня ртути (измерения по усиленную спектральной линии натрия 442.3/2.0 нм); 2 — 6^3P_0 -уровня ртути (измерения по усилению линии натрия 475.3/4.8 нм); 3 — 6^3P_0 -уровня ртути (измерения по усилению линии натрия 515.3/4.9 нм); 4 — 6^2S -уровня натрия.

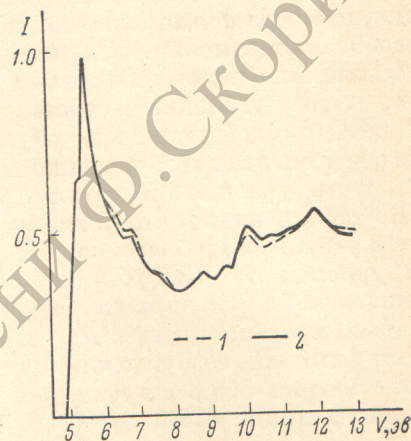


Рис. 3. Форма функции возбуждения 6^3P_1 -уровня ртути.

1 — 6^3P_1 по λ 4423/20Å NaI [9S]; 2 — 6^3P_1 по λ 2537 Å Hg I.

475.3 нм. Данные этих измерений сведены в табл. 2, откуда видно, что время жизни 6^3P_1 -состояния ртути

зависит от упругости паров ртути, так как оно в условиях эксперимента определяется пленением излучения, а время жизни метастабильного состояния мало зависит от упругости паров и в основном определяется скоростью разлета атомов к стенкам и электродам.

Таблица 2

$N_{0\text{Hg}}/N_{0\text{Na}}$	$\tau_{6^3P_1} \cdot 10^6$, сек.	$\tau_{6^3P_0} \cdot 10^6$, сек.	$Q_{e6^3P_1} \cdot 10^{17} \text{ см}^2$ при 15 эВ		$Q_{e6^3P_0} \cdot 10^{17} \text{ см}^2$ при 15 эВ
			настоящая работа	[7]	
18	1.1	14.0	2.5 ± 0.5	2.7	0.5 ± 0.3
24	1.4	13.0	—	—	—
43	3.1	13.5	—	—	—

Значение эффективного сечения электронного возбуждения 7^2S - и 9^2S -уровней натрия было взято из работы [6], а значение эффективных сечений передачи возбуждения ударом 2-го рода — из работы [4]. Результаты расчета по соотношениям (4) и (5) приведены в табл. 2. Для сравнения там приводятся также результаты измерений величины эффектив-

ного сечения электронного возбуждения уровня ртути 6^3P_1 , полученного Ионгериусом [7] и подтвержденного Запесочным [6]. Как видно, наблюдается вполне удовлетворительное согласие с рассчитанным из измерений усиления спектральных линий натрия.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность С. Э. Фришу за внимание к работе и обсуждение результатов.

Литература

- [1] Н. Beutler, В. Josephy. Zs. Physik, 53, 747, 1929.
- [2] С. Э. Фриш, Э. К. Краулия. ДАН СССР, 101, 837, 1955.
- [3] А. А. Ферхмин, С. Э. Фриш. Phys. J. USSR, 9, 466, 1936; Изв. АН СССР, сер. физ., 3, 431, 1936.
- [4] С. Э. Фриш, О. П. Бочкова. Изв. АН СССР, сер. физ., 27, 1065, 1963.
- [5] И. П. Богданова, В. Д. Марусин. Опт. и спектр., 26, 154, 1969.
- [6] И. П. Запесочный. Докт. дисс., Ужгород, 1966.
- [7] Н. М. Jongerius. Measurements of optical excitation functions of the mercury atom. Proefschrift, Utrecht, 1961.

Поступило в Редакцию 24 декабря 1970 г.