

Ж 53
№ 62

УДК 539.184

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ
И ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПЕРЕХОДОВ Hg II

И. В. Семенова и Ю. М. Смирнов

На основании измерений 97 функций возбуждения линий Hg II электронным ударом из основного состояния атома ртути рассчитаны сечения возбуждения для 6 уровней Hg II. Для четырех из них учтен вклад каскадного заселения, роль которого уменьшается с уменьшением квантового числа l . С использованием литературных данных о радиационных временах жизни уровней Hg II определены вероятности переходов для 10 линий иона ртути.

Ртуть широко применяется как активная среда в различных газоразрядных приборах, прежде всего в источниках излучения. При этом в мощных импульсных источниках света, а также в лазерах на парах ртути достигается высокая степень ионизации и возбуждаются энергетические уровни ионов, что приводит к появлению ионных линий в спектре ртутного разряда. Однако до настоящего времени, несмотря на опубликование многочисленных работ, авторы которых исследовали возбуждение ртути, как процессы возбуждения состояний иона ртути, так и процессы излучения почти не изучены; практически во всех работах исследовано лишь возбуждение нескольких низколежащих уровней атома ртути.

В значительной степени это может быть связано с очень плохим состоянием сведений о спектре ртути и с почти полным отсутствием достоверной классификации термов Hg II. Полный набор квантовых чисел установлен лишь для немногих состояний Hg II; зачастую довольно сильные линии, появляющиеся в спектре ртути, не классифицированы.

Нами создана установка для изучения возбуждения ртути электронным ударом; основные характеристики установки сообщаются в [1]. Использована пушка типа Ганле с сечением электронного пучка 13×190 мм² при плотности тока около 10 А/м² и ширине энергетического распределения 1.0 эВ для 90% электронов при их энергии 100 эВ. Давление паров ртути в рабочей камере соответствовало давлению насыщенных паров при температуре 12° С; атомы ртути заполняли весь объем экспериментальной трубки, но пролетное расстояние для электронов составляло лишь 24 мм.

Измерены 97 функций возбуждения спектральных линий Hg II, возникающих в результате их возбуждения прямым электронным ударом из основного состояния атома Hg (т. е. с одновременной ионизацией). Исследованные линии расположены в области спектра от 220 до 800 нм; энергия электронов изменялась от пороговой до 400 эВ. Полученные функции возбуждения калибровались по одновременно возбуждаемым линиям Hg I с известными величинами сечений, что позволило определить масштаб абсолютных значений для сечений возбуждения линий Hg II.

В табл. 1 приведены основные характеристики для сильнейших линий Hg II, сечения возбуждения которых превосходят $1.0 \cdot 10^{-18}$ см², а также для трех более слабых линий, сечения возбуждения которых измерены в работе [2] (в этой работе абсолютные значения сечений возбуждения даны при энергии электронов 60 эВ; для сопоставления с нашими резуль-

Таблица 1
Сечения возбуждения спектральных линий Hg II

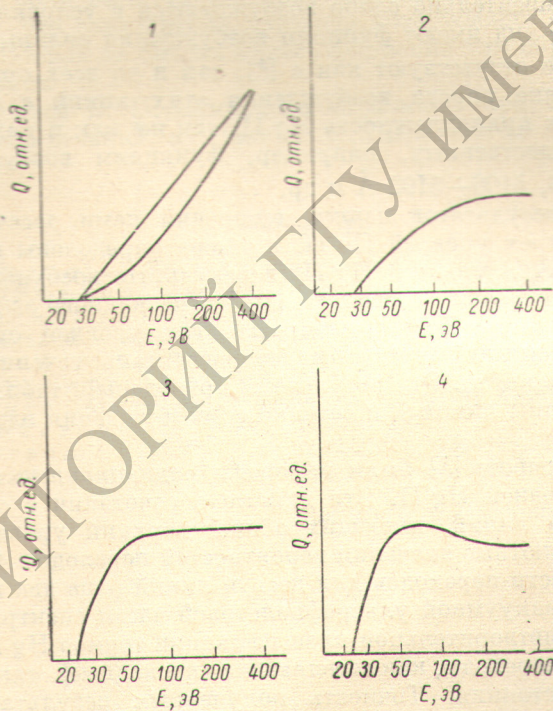
Длина волны, Å	Переход	Положение максимума, эВ	Q _{max} , 10 ⁻²⁰ см ²		Тип функции возбуждения
			напи измерения	[°]	
2224.03 2224.71	— 6 ² P _{3/2} — 6d ² D _{5/2}	57	566	110	4
2224.82	—				
2260.26	6 ² P _{1/2} — 7s ² S _{1/2}	47	316	70	4
2262.23	—	47	473	70	4
2296.23	—	400	252	—	1
2847.47	6 ² P _{3/2} — 7s ² S _{1/2}	47	92	70	4
2855.39	4 ² D _{3/2} — 4P _{3/2}	135	43	12	2
2856.27	—				
2856.53	6 ² D _{3/2} — 7 ² F _{3/2}	85	163	—	4
3208.20	—	300	122	—	2
3208.96	7 ² F _{3/2} — 7 ² G				
3374.52	9 ² D _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	400	158	—	1
3378.26	—				
3804.77	4 ² D _{3/2} — 4 ² D _{5/2}	65	103	—	4
3806.28	7 ² P _{3/2} — 5 ² D _{3/2}				
3804.29	7 ² F _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	400	292	—	2
3804.92	—				
3863.96	—	400	62	13	4
4044.10	7 ² F _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	47	101	—	4
	7 ² P _{3/2} — 4 ² D _{3/2}				
4081.20	—	47	268	—	4
4083.49	5 ² D _{3/2} — 4 ² D _{3/2}				
4259.30	—	400	128	—	1
4261.88	7 ² D _{3/2} — 5 ² D _{3/2}				
4284.6	10 ⁴ P _{3/2} — 6 ² D _{3/2}	400	192	—	1
4518.59	8 ² D _{3/2} — 5 ² D _{3/2}	400	113	—	1
	10 ⁴ F _{7/2} — 4 ² D _{3/2}				
4543.59	6 ⁴ D _{3/2} — 2 ² D _{3/2}	400	195	—	1
4556.38	5 ⁴ D _{7/2} — 2 ² D _{3/2}	400	206	—	1
4586.92	10 ² D _{3/2} — A	400	221	—	1
4638.84	11 ² D _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	400	230	—	1
4656.17	7 ² D _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	400	194	—	1
4660.28	—				
4686.82	3 ⁴ D _{7/2} — 3 ² D _{3/2}	400	228	—	1
4696.25	5 ² D _{5/2} — 4 ² D _{3/2}	400	212	—	1
4704.63	5 ² F _{7/2} — 9 ² G	400	230	—	1
4855.72	7 ² P _{3/2} — 9 ² S _{1/2}	400	241	—	1
4883.1	—	400	238	—	1
5051	—	400	238	—	1
5076	—	400	237	—	1
5100.32	6 ⁴ P _{3/2} — 4 ² P _{3/2}	400	126	—	1
5102.42	11 ⁴ P _{3/2} — 4 ² D _{3/2}				
5425.25	8 ² D _{3/2} — 4 ² D _{3/2}	115	230	—	4
	6 ² D _{3/2} — 5 ² F _{7/2}				

Таблица 1 (продолжение)

Длина волны, Å	Переход	Положение максимума, эВ	Q _{max} , 10 ⁻²⁰ см ²		Тип функции возбуждения
			наши измерения	[²]	
5595.40	—	400	205	—	1
5677.17	6d ² D _{5/2} — 5f ² F _{7/2} ⁰	250	440	—	4
5871.73	—	250	114	—	2
6149.50	7s ² S _{1/2} — 7p ² P _{3/2} ⁰	47	137	—	3
6638.7	12 ⁴ P _{5/2} — 4D _{7/2} ²	250	146	—	1
	13 ⁴ P _{5/2} — 2D _{5/2} ²				
7344.16	—	75	70	—	4
7346.37	7p ² P _{3/2} ⁰ — 7d ² D _{5/2}				
7944.66	7 ² S _{1/2} — 7 ² P _{1/2} ⁰	200	735	—	4

татами значения из [²] приведены нами к максимуму функций возбуждения). Тип функции возбуждения указан в соответствии с номером кривой на рисунке.

Отождествление линий Hg II производилось по таблицам спектральных линий [³], а также по всем первоисточникам, упоминаемым в этих



Функции возбуждения Hg II.

таблицах. В ряде первоисточников дана классификация переходов; мы использовали также более поздние данные из [⁴]. Можем с сожалением отметить, что даже в фундаментальной работе [⁵] классификация термов Hg II неудовлетворительна. Однако для определения принадлежности линий атому или иону той или иной кратности ионизации могут быть весьма полезны эксперименты по возбуждению монокинетичным пучком электронов, так как в них надежно определяется пороговая энергия и принадлежность линии. Например, нами было установлено, что линия

589.016 нм, не классифицированная на основе газоразрядных данных, имеет порог возбуждения около 20 эВ и, следовательно, принадлежит Hg II. Точное установление принадлежности линий необходимо для надежной классификации переходов.

Анализируя результаты табл. 1, следует прежде всего отметить систематическое расхождение измеренных нами сечений с результатами работы [2] в 4-5 раз (исключение представляет линия 2847.67 Å). В то же время величины сечений возбуждения линий Hg I, измеренные нами в этом же эксперименте, такого расхождения с результатами других авторов не обнаруживают. Наиболее вероятной причиной расхождения мы считаем недостаточную точность калибровки аппаратуры в работе [2] в ультрафиолетовой части спектра (возбуждение линий Hg II в видимой области в [2] не исследовано). Более подробное сопоставление наших данных с [2] невозможно, поскольку значительная часть исследованных в [2] линий Hg II лежит за пределами спектрального диапазона нашей аппаратуры.

Обращает на себя внимание группа сильных линий, лежащих в диапазоне 4558-4686 Å. Сечения возбуждения этих линий велики; в то же время эти линии существуют в спектроскопических таблицах [3] и были нами обнаружены лишь в оригинальной работе [6]. Все эти линии, так же как и содержащиеся в [2] в области 4200-5100 Å, имеют функции возбуждения с очень длинным максимумом ($E_{\max} \geq 400$ эВ). Функции возбуждения их мгновенно нарастают от пороговой энергии до 400 эВ; видимо, по этой причине они относительно слабо возбуждаются в условиях газового разряда. Такой же вид имеют функции возбуждения сильных линий 5051 и 5076 Å, которые существуют как в [2], так и во всех оригинальных работах. Положение порога возбуждения этих линий с несомненностью указывает на их принадлежность Hg II, так же как и вид функций возбуждения, тождественных, например, функциям возбуждения линий 4556, 4586, 4686, 5100-5110 Å и др.

На основе результатов этих измерений нами рассчитаны факторы ветвления для трех уровней Hg II, а также определены полные сечения заселения Q'_k шести уровней Hg II (в результате возбуждения электронным ударом из основного состояния Hg I и каскадного заселения с вышележащих состояний). Для четырех из этих уровней определена доля заселения каскадными переходами и рассчитано сечение возбуждения электронным ударом q_k . Эти результаты приведены в табл. 2, где указана также длина волны линии λ и сечение ее возбуждения электронным ударом Q .

В недавней работе [7] были измерены радиационные времена жизни τ_k для семи уровней Hg II. Эти данные в сочетании с относительными интенсивностями линий, имеющих общий верхний уровень, позволяют определить абсолютные значения вероятностей переходов A_{ki} . Нами определены вероятности переходов для десяти линий (еще два перехода из [7] расположены в вакуумной ультрафиолетовой части спектра).

Из-за неудовлетворительной классификации термов Hg II нами учтены лишь немногие переходы, как заселяющие (каскадные), так и опустошающие данные состояния. Точность полученных результатов невелика, в результате чего, например, вклад каскадных переходов в заселение состояния $7s^2S_{1/2}$ оказался больше, чем полное сечение возбуждения этого состояния, определенное по излучательным переходам из него на нижележащие уровни. Точность измерения абсолютных величин сечений составляет в нашем эксперименте 30%; точность определения Q'_k и q_k не поддается оценке.

Тем не менее можно проследить тенденцию к уменьшению доли каскадного заселения при увеличении квантового числа l исследуемого уровня. Следует также отметить, что прямое возбуждение уровней Hg II электронным ударом может вносить существенный вклад в заселение лазерных уровней Hg II. В исследованной нами области спектра расположены три

Сечения возбуждения уровней и вероятности переходов Hg II

Верхний уровень	Нижний уровень	λ , Å	$Q_{\text{в}}^{(0)}$, 10^{-20} см ²	τ_k , нс	$A_{ki}^{(0)}$, 10^8 с ⁻¹	$Q_{\text{в}}'$, 10^{-20} см ²	$\frac{\sum \text{кас.}}{Q_{\text{в}}'}$	$10^{-20} \frac{g_k}{\text{см}^2}$
$7s^2S_{1/2}$	$6p^2P_{1/2}$	2260.26	316	1.9	4.06	408	2.14	-464
	$6p^2P_{3/2}$	2847.67	92		1.21			
$9s^2S_{1/2}$	$7p^2P_{3/2}$	4855.75	141	10	1.0	141	0.74	197
	$6p^2P_{3/2}$	2224.71	566	2.2	3.36	765		
$6d^2D_{5/2}$	$2F_{5/2}^o$	3500.35	6.65		0.04			
	$10^4P_{5/2}$	4284.70	192		1.14			
$8d^2D_{3/2}$	$7p^2P_{1/2}$	3806.38	103	8.5	0.56	216		
	$5^2D_{3/2}$	4518.59	113		0.61			
$5f^2F_{5/2}$	$6^2D_{3/2}$	5425.25	230	7.2	1.39	230	0.41	136
$5f^2F_{7/2}$	$6^2D_{5/2}$	5676.17	440	7.2	1.39	440	0.61	170

лазерных перехода Hg II [8]; все три линии 5677.17, 6149.50, 7346.37 Å нами обнаружены и имеют сравнительно большие сечения возбуждения. Наш вывод о роли прямого возбуждения находится в согласии с выводом [8] о том, что резонансная передача возбуждения состояниям Hg II от He и Ar в лазерах на смесях малосущественна для образования инверсной заселенности.

Мы благодарим В. П. Самойлова за помощь при определении абсолютных величин сечений, а также В. П. Шевелько за полезные консультации.

Литература

- [1] И. В. Семенова, Ю. М. Смирнов. Опт. и спектр., 41, 712, 1976.
- [2] А. А. Митюрёва. Автореф. канд. дисс., Л., 1976.
- [3] А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский, Е. А. Шрейдер. Таблицы спектральных линий. «Наука», М., 1969.
- [4] Landolt-Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. Bd. I, T. I, Berlin, 1950.
- [5] C. E. Moore. Atomic energy levels, vol. 3, NBS, Washington, 1958.
- [6] T. S. Subbaraya. Z. Physik, 78, 541, 1932.
- [7] T. Andersen, G. Sørensen. JQSRT, 13, 369, 1973.
- [8] Газовые лазеры (под ред. Н. Н. Соболева). «Мир», М., 1968.

[Поступило в Редакцию 28 февраля 1977 г.]