

РАДИАЦИОННЫЕ ВРЕМЕНА ЖИЗНИ
ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ И ИОНОВ МЕДИ*А. Л. Ошерович, Г. Л. Плехоткина и В. Р. Обидин*

Излагаются результаты измерений радиационных времен жизни возбужденных состояний атомов и ионов меди. Для исследований использовался многоканальный метод задержанных совпадений с пересекающимися атомным и электронным пучками.

Времена жизни атомов и ионов меди представляют интерес для физики низкотемпературной плазмы, астрофизики, а также для объяснения физических процессов в газовых лазерах, в которых пары меди используются в качестве активного вещества [1-6]. Самостоятельное значение имеют систематические исследования констант распада возбужденных состояний Cu I и Cu II.

В настоящее время в этой области имеется несколько теоретических и экспериментальных работ. Методом псевдопотенциала [7] и в кулоновском приближении волновой функции оптического электрона [8] получено теоретическое значение времени жизни для возбужденного $4d^2D_{3/2}$ -состояния атома меди. Последний метод использован также в работе [9] для расчета полуэмпирических значений времен жизни, вероятностей переходов и сил осцилляторов ряда возбужденных состояний Cu I.

При экспериментальных исследованиях в основном использовались следующие методы: «пучок-пленка», пересечения уровней, двойного оптического резонанса, сдвига фаз, электронно-оптической хронографии и «крюков» Рождественского. Анализ имеющихся в литературе данных показывает, что экспериментальные работы посвящены исследованиям времен жизни главным образом нижних возбужденных состояний атомов меди, а для верхних, а также ионных уровней информация практически отсутствует. Опубликованные результаты иногда имеют расхождение более чем в 6 раз.

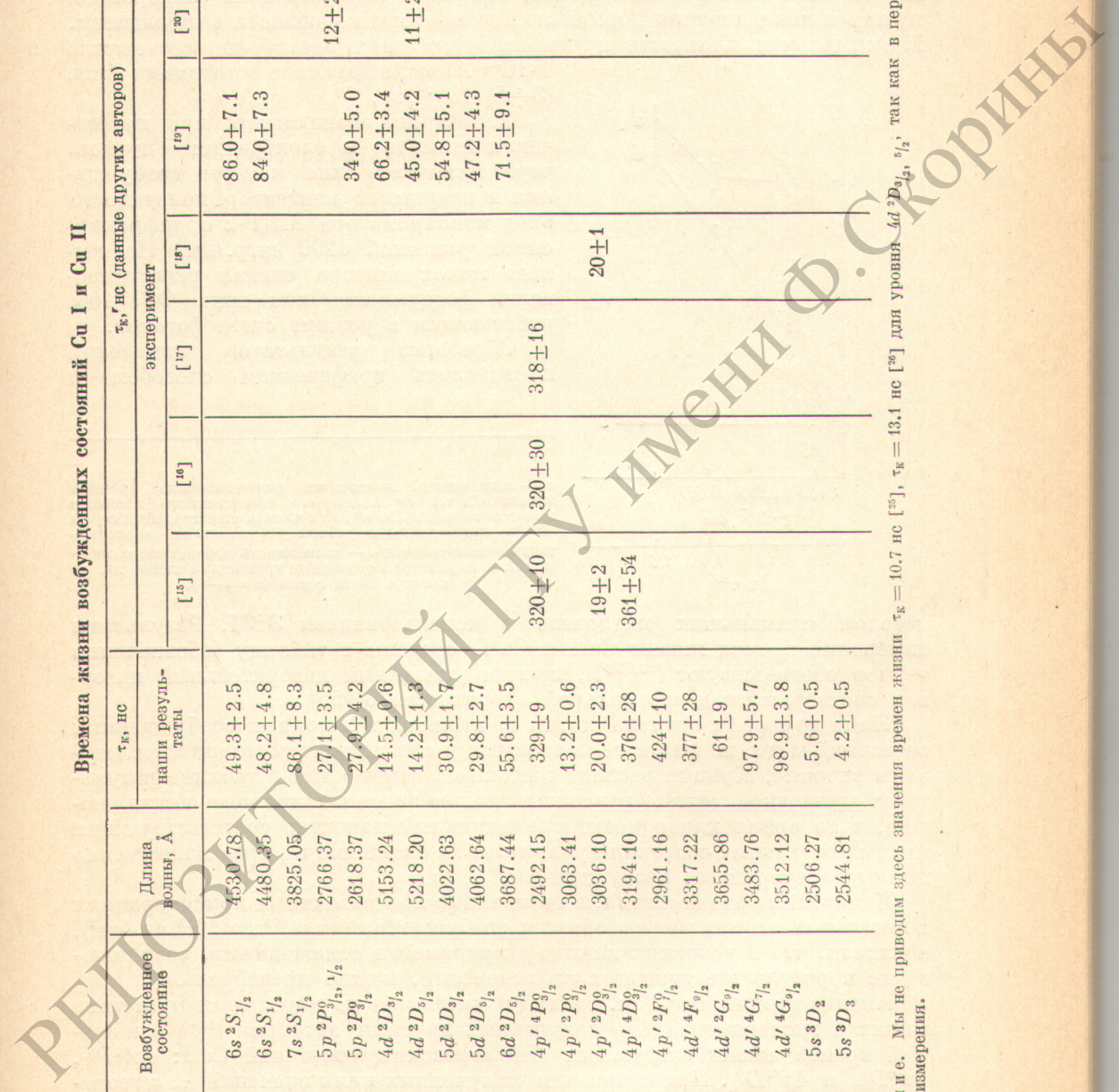
Целью нашей работы являлось проведение систематических исследований времен жизни Cu I и Cu II. При этом мы использовали многоканальный метод задержанных совпадений. Возбуждение атомов меди происходило в области пересечения атомного и электронного пучков [10]. Использование атомного пучка позволило снизить искажающее влияние ударов второго рода [11], а также упростить (по сравнению с паронаполненной ячейкой) технику получения необходимой концентрации нормальных атомов меди.

Для получения паров меди в камере возбуждения в настоящее время используются лазерный нагрев, электронная бомбардировка и электрическая печь. В нашей установке использовался приспособленный для получения паров трудноиспаримых металлов атомный источник с электрической печью. Чистая электролитическая медь загружалась в графитовый цилиндрический тигель. Нагревательным элементом служила трубка из танталовой фольги, через которую пропусклся электрический ток. Формирование атомного пучка осуществлялось системой горячих и холод-

Времена жизни возбужденных состояний Cu I и Cu II

Атом	Возбужденное состояние	Длина волны, Å	τ _к , нс наши результаты	τ _к , нс (данные других авторов)					теоретический расчет				
				[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[7]	[8]	[9]	
Cu I	6s ² S _{1/2}	4530.78	49.3 ± 2.5					86.0 ± 7.1					52.8
	6s ² S _{1/2}	4480.85	48.2 ± 4.8					84.0 ± 7.3					100.50
	7s ² S _{1/2}	3825.05	86.1 ± 8.3										
	5p ² P _{3/2, 1/2}	2766.37	27.1 ± 3.5								12 ± 2		
	5p ² P _{3/2}	2618.37	27.9 ± 4.2										
	4d ² D _{3/2}	5153.24	14.5 ± 0.6										
	4d ² D _{5/2}	5218.20	14.2 ± 1.3										
	5d ² D _{3/2}	4022.63	30.9 ± 1.7										
	5d ² D _{5/2}	4062.64	29.8 ± 2.7										
	6d ² D _{5/2}	3687.44	55.6 ± 3.5										
	4p ⁴ P _{3/2}	2492.15	329 ± 9		320 ± 10	320 ± 30	318 ± 16						
	4p ⁴ P _{3/2}	3063.41	13.2 ± 0.6										
4p ⁴ D _{3/2}	3036.10	20.0 ± 2.3								20 ± 1			
4p ⁴ D _{3/2}	3194.10	376 ± 28		19 ± 2									
4p ⁴ F _{7/2}	2961.16	424 ± 10		361 ± 54									
4d ⁴ F _{3/2}	3317.22	377 ± 28											
4d ⁴ G _{9/2}	3655.86	61 ± 9											
4d ⁴ G _{7/2}	3483.76	97.9 ± 5.7											
4d ⁴ G _{9/2}	3512.12	98.9 ± 3.8											
5s ³ D ₂	2506.27	5.6 ± 0.5											
5s ³ D ₃	2544.81	4.2 ± 0.5											
Cu I	Пейтлеровские состояния												
Cu II													

Примечание. Мы не приводим здесь значения времен жизни τ_к = 10.7 нс [25], τ_к = 13.1 нс [26] для уровня 4d²D_{3/2, 5/2}; так как в перечисленных работах не указана погрешность измерения.



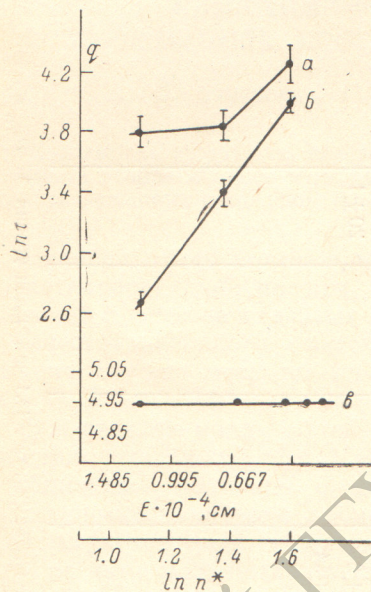
ных щелей. Устранение магнитного поля из области возбуждения атомов меди предусматривалось конструкцией атомного источника и нагревателя.

Пучок возбуждающих электронов формировался с помощью трех-электродной электронной пушки с толстослойным оксидным катодом диаметром 10 мм. Частота возбуждающих импульсов изменялась в пределах от 420 кГц до 3.2 МГц при длительности импульса $10 \div 40$ нс. Эти параметры подбирались для каждого исследованного уровня отдельно. Энергия возбуждающих электронов выбиралась в диапазоне значений $20 \div 300$ эВ с учетом положения максимума функции возбуждения [12] исследуемой спектральной линии, величины анодного тока электронной пушки и концентрации нормальных атомов меди в области возбуждения. Максимальная плотность пучка возбуждающих электронов составляла

$1 \cdot 10^{-3}$ А/см², а давление остаточных газов $(3 \div 5) \cdot 10^{-7}$ тор.

Излучение, возникающее при пересечении атомного и электронного пучков, через кварцевое окно камеры возбуждения и кварцевый конденсор попадало на вход монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 1200 штр./мм. На выходе монохроматора сигнал регистрировался фотоумножителем типа ФЭУ-106, работающим в режиме счета фотонов.

Обработка результатов измерений проводилась графическим способом и



а — зависимость логарифма радиационного времени жизни ($\ln \tau_k$) от логарифма эффективного главного квантового числа ($\ln n^*$) для членов спектральной серии $n d^2 D_{3/2}$, по результатам работы [19]; б — то же по результатам нашей работы; в — зависимость эффективного орбитального параметра q от энергии уровня для членов той же спектральной серии ($n=4-8$).

методом наименьших квадратов с использованием ЭВМ. Результаты измерений времен жизни Cu I и Cu II сведены в таблицу (обозначения термов соответствуют [13, 14]), причем указанный доверительный интервал соответствует доверительной вероятности 0.95.

Нами измерены времена жизни 17 атомных и 2 ионных возбужденных состояний меди, из них восемь атомных и оба ионных состояния исследованы впервые. Кривые распада состояний, отмеченных в таблице результатов звездочкой, можно разложить на две экспоненциальные составляющие, в то время как одноэкспоненциальный характер соответствующих кривых остальных состояний указывает на заселение их преимущественно прямым электронным возбуждением.

Измерения времен жизни, выполненные при различных концентрациях нормальных атомов меди в области возбуждения (от 10^{10} до 10^{12} ат./см³), показали, что в условиях нашего эксперимента искажениями, возникающими в результате тушащих столкновений, можно пренебречь.

Анализ результатов (см. таблицу) указывает на хорошее соответствие наших и экспериментально полученных другими авторами [15-18] значений времен жизни следующих бейтлеровских состояний Cu I: $4p'^4 P_{3/2}^0$, $4p'^2 D_{3/2}^0$ и $4p'^4 D_{3/2}^0$. При сравнении полученных нами значений τ_k с теоретически рассчитанными в работах [7-9] наблюдается также хорошее согласие для состояний $6s^2 S_{1/2}$, $5d^2 D_{3/2}$ и $6d^2 D_{3/2}$.

Результат, полученный нами для состояния $5p^2 P_{3/2, 1/2}^0$, мы относим одновременно к двум компонентам его тонкого расщепления, составляющего 0.31 см^{-1} [13], так как наша спектральная система не позволяет разрешить эти подуровни.

Время жизни, определенное для близкорасположенных уровней $5d^2D_{3/2}$ и $5d^2D_{5/2}$, соответствует, по-видимому, времени жизни состояния с $J=5/2$ ($\lambda=4062,64 \text{ \AA}$), так как интенсивность этой линии в три раза превышает интенсивность линии, возникающей при переходе с уровня, имеющего $J=3/2$ ($\lambda=4063,24 \text{ \AA}$).

Отметим, что имеются значительные (в 2—5 раз) систематические расхождения между нашими значениями времени жизни возбужденных состояний Cu I и полученными в работе [19]. Предположение о завышении результатов в этой работе подтверждает совпадение (в пределах погрешности) наших значений τ_k с полученными в [8, 9, 20]. Укажем также, что результаты для компонент тонкой структуры состояния $4d^2D$, приведенные в [19], отличаются друг от друга на величину, значительно превышающую погрешность измерения.

Прямолинейный характер графика (см. рисунок, в) зависимости эффективного орбитального параметра q от энергии уровня указывает [21] на отсутствие конфигурационного взаимодействия для членов спектральной серии $nd^2D_{3/2}$ ($n=4-8$) и выполнимость одноэлектронного приближения в этом случае. Отсюда следует [22, 23], что графиком зависимости $\ln \tau_k$ ($\ln n^*$) должна быть прямая линия, что имеет место для результатов нашего эксперимента (см. рисунок, б). Аналогичный график (см. рисунок, а), построенный по результатам работы [19], прямолинейным не является, что заставляет предположить наличие в соответствующем эксперименте неучтенных источников погрешности. Детальное сравнение методик регистрации процессов распада возбужденных состояний в нашей работе и в [19] дает возможность объяснить указанное выше систематическое расхождение экспериментальных результатов особенностями регистрации излучения в методе электронно-оптической хронографии [24].

Литература

- [1] J. F. Asmus, N. K. Mosur. Appl. Phys. Lett., 13, 384, 1968.
- [2] Che J. Chen, G. R. Russell. Appl. Phys. Lett., 26, 9, 1975.
- [3] О. С. Акиртава, В. Л. Джикия, Ю. М. Олейник. Квант. электрон., 2, 1831, 1975.
- [4] А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Ю. Леммерман, Г. Г. Петраш, А. Н. Трофимов. Квант. электрон., 3, 1800, 1976.
- [5] А. А. Исаев, М. А. Казарян, Г. Г. Петраш. Письма ЖЭТФ, 16, 40, 1972.
- [6] А. А. Исаев, Г. Ю. Леммерман. Квант. электрон., 4, 1413, 1977.
- [7] G. McGinn. J. Chem. Phys., 50, 1404, 1969.
- [8] C. H. Corliss. J. Res. Nat. Bur. Stand., 74A, 781, 1970.
- [9] A. Lindgard, L. J. Curtis, I. Martinson, S. E. Nielsen. Phys. Scr., 21, 47, 1980.
- [10] А. Л. Ошеревич, М. Л. Бурштейн, Я. Ф. Веролайнен, А. Я. Николаич. ПТЭ, 6, 210, 1975.
- [11] Н. Н. Безуглов, А. Л. Ошеревич. Вестн. ЛГУ, 16, 44, 1978.
- [12] И. С. Алексахин, А. А. Боровик, В. П. Стародуб, И. И. Шафранько. Ж. прикл. спектр., 30, 236, 1979.
- [13] C. R. Moore. Atomic energy levels. NBS, Circ. 467, Washington, 1958.
- [14] А. Р. Стриганов, Н. С. Свентицкий. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. Атомиздат, М., 1966.
- [15] H. Krellmann, E. Siefert, E. Wehreter. J. Phys. B, 8, 2608, 1975.
- [16] H. Bucka, J. Ney, K. P. Wirtnik. Z. Phys., 202, 22, 1967.
- [17] J. Kowalski, G. Pultiz. Z. Phys., 208, 459, 1968.
- [18] E. Siefert, J. Ney, H. Bucka, H. Bolouri. J. Phys. B, 7, 1279, 1974.
- [19] Ю. И. Малахов. Опт. и спектр., 44, 214, 1978.
- [20] L. J. Curtis, V. Engman, I. Martinson. Phys. Scr., 13, 109, 1976.
- [21] П. Ф. Груздев, А. И. Шерстюк. Опт. и спектр., 44, 617, 1976.
- [22] П. Ф. Груздев, Н. В. Афанасьева. Опт. и спектр., 45, 631, 1978.
- [23] А. Л. Ошеревич, Я. Ф. Веролайнен, В. И. Привалов, С. А. Пулькин. ДАН СССР, 248, 644, 1979.
- [24] Ю. Н. Малахов, В. А. Фабрикант. Опт. и спектр., 34, 645, 1973.
- [25] M. Riemann. Z. Phys., 179, 38, 1964.
- [26] M. Kock, J. Richter. Z. Astrophys., 69, 180, 1968.

Поступило в Редакцию 10 апреля 1980 г.