

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ УРОВНЕЙ КгII МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ

Ю. И. Малахов и В. А. Фабрикант

Для измерения радиационных времен жизни возбужденных атомных состояний развит метод электронно-оптической хронографии. В настоящей работе приведены результаты измерения τ для некоторых уровней КгII в наносекундном диапазоне.

В связи с исследованием физики процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, и разработкой газоразрядных источников излучения (импульсные лампы, лазеры), значительно возрос интерес к определению ряда атомных констант. К числу таких констант, в частности, относится радиационное время жизни атома в возбужденном состоянии τ . Теоретический расчет времен жизни сопряжен с большими трудностями и пока не всегда выполним. Поэтому для многих атомов и молекул единственной возможностью надежного определения τ остается эксперимент. Для определения τ наиболее развитым является метод задержанных совпадений с использованием многоканального анализатора [1]. Временное разрешение этого метода составляет несколько наносекунд, а время измерения (накопление импульсов) — десятки минут.

Однако для решения ряда экспериментальных задач, связанных с исследованием кинетики заселения и распада атомных и ионных уровней, требуется более быстродействующая аппаратура как по временному разрешению, так и по сокращению продолжительности измерения. Последнее требование особенно важно при исследовании химически активных веществ.

Каждая установка, предназначенная для временных измерений, содержит два основных узла — электронную трубку для возбуждения атомов исследуемого вещества электронным пучком и приемник излучения.

Ранее мы сообщали о разработке электронной трубки металлокерамической конструкции, позволяющей осуществить возбуждение атомов за время, близкое к 1 нсек. [2]. Приемником излучения в нашей установке является многокаскадный импульсный электронно-оптический усилитель света, сочетающий высокое временное разрешение, близкое к 10^{-12} сек. [3], и предельно высокую чувствительность, позволяющую фотографически регистрировать световые вспышки с выходного экрана ЭОП, обусловленные эмиссией единичных электронов с входного фотокатода. При этом фотографическая плотность почернения фотоэмульсии обеспечивается равной единице.

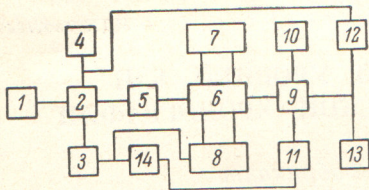
Экспериментальная установка

Блок-схема всей установки в целом представлена на рис. 1. Электронная трубка 2 постоянно соединена с вакуумным агрегатом 1. Все вакуумные коммуникации выполнены из металла. Исследуемый газ из металлического баллона через редуктор и натекагель подается в 2. Для дополнительной очистки газа используется ловушка, наполненная цеолитом. Измере-

ния τ выполняются в режиме протока газа через камеру возбуждения, что обеспечивает более чистые условия по сравнению с режимом периодического заполнения.

Импульс напряжения для модуляции возбуждающего электронного пучка поступает с выхода наносекундного генератора 3. Контроль пара-

Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.



1 — вакуумный агрегат ВА-05-4, 2 — электронная трубка, 3 — наносекундный генератор Г5-12, 4 — контрольный осциллограф С1-11, 5 — спектрограф ИСП-51, 6 — ЭОП типа УМИ-95, 7 — высоковольтный источник напряжения и стабилизатор тока, 8 — генератор затворных импульсов и генератор линейной развертки, 9 — щелевой диссектор типа ЛИ-602, 10 — блок питания диссектора, 11 — генератор линейной развертки диссектора, 12 — экспоненциально моделирующее устройство, 13 — измеритель временных интервалов типа И2-17, 14 — регулируемая линия задержки.

метров (фронт, длительность, срез, амплитуда) как модулирующего импульса, так и тока возбуждения в 2 обеспечивается осциллографом 4. Осциллограмма тока возбуждения приведена в [4].

Излучение из 2 фокусируется на входную щель спектрографа 5. Выделенная линия проецируется на фотокатод электронно-оптического преобразователя 6. Катод закрыт непрозрачной маской, имеющей прорезь, форма и размеры которой совпадают с изображением спектральной линии. При этом отпадает необходимость в снятии зонной характеристики фотокатода. Все необходимые электронные блоки 7, 8, 10, 11 для управления ЭОП нестандартного типа и изготовлены самостоятельно. В блоке 7 расположен высоковольтный стабилизированный шестиканальный источник, создающий ускоряющее напряжение на камерах ЭОП, а также стабилизатор тока для магнитной фокусирующей системы ЭОП. Источник питания смонтирован полностью на транзисторах, стабилизатор тока — на лампах. Предусмотрена возможность импульсного питания магнитной системы. При этом существенно снижается нагрев соленоида, а также увеличивается отношение сигнала к шуму на выходном экране ЭОП. Электронная схема коммутации изображения 8 состоит из генератора развертки и генератора прямоугольных импульсов. Прямоугольный импульс (рис. 2) открывает затвор преобразователя на время регистрации процесса, а генератор развертки осуществляет линейную развертку спектральной линии по экрану ЭОП.

Изображение с экрана ЭОП переносится на фотокатод щелевого диссектора 9. Используется фотоэлектрический метод обработки эопограмм непосредственно на экране [5] без предварительной регистрации их на фотопленке. Подобный метод дает значительный выигрыш в скорости обработки результатов, а также расширяет динамический диапазон фоторегистратора в целом. Ускоряющее, фокусирующее и тормозящее напряжения для 9 поступают с выхода транзисторного стабилизированного источника 10. Развертывающее напряжение на пластины 9 подается с генератора 11. Эопограмма на экране преобразователя держится конечное время, определяемое послесвечением люминофора $\tau_{\text{л}}$, поэтому время ее ска-

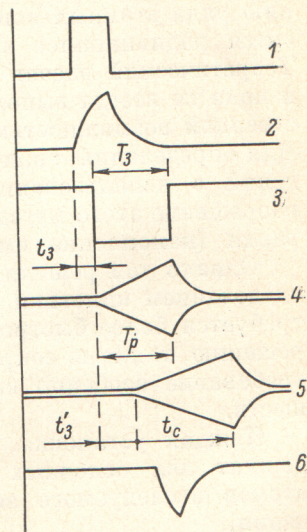


Рис. 2. Временные диаграммы.

1 — ток возбуждения в электронной трубке, 2 — изменение интенсивности спектральной линии во времени, 3 — форма импульса на затворе УМИ-95, 4 — напряжение на развертывающих пластинах УМИ-95, 5 — напряжение на развертывающих пластинах ЛИ-602, 6 — сигнал на коллекторе ЛИ-602, $T_3 = 10 \div 1000$ нсек., $T_p = 10 \div 1000$ нсек., $t_c = 1$ мсек., t_3, t'_3 — задержка синхронизации (подбирается экспериментально).

нирования t_c должно быть согласовано с τ_d . При $\tau_d/t_c \sim 100$ погрешность фотометрирования, обусловленная этим фактором, не превышает 1%. Генератор развертки 11 запускается синхронно с запуском фоторегистратора, но с некоторой регулируемой задержкой 14, что обеспечивает фотометрирование в момент, когда яркость изображения на экране наибольшая. Электрический сигнал с коллектора 9 поступает в блок обработки, состоящий из экспоненциального моделирующего устройства 12 и измерителя временных интервалов 13. Моделирующее устройство выполнено на импульсных быстродействующих диодах. Используется тот участок их характеристики, на котором связь между приложенным напряжением и током является экспоненциальной. Это устройство позволяет проверить экспоненциальность кривой затухания. Если время жизни исследуемого уровня сопоставимо с длительностью среза возбуждающего импульса тока τ_c в электронной трубке 2, то обработку эопограмм приходится начинать после прекращения возбуждения, однако при этом величина полезного сигнала уменьшается. Наличие 12 позволяет учесть τ_c и начать обработку одновременно с началом спада тока возбуждения. Для этого сигнал с токового измерительного сопротивления, включенного последовательно с 2, подается на соответствующий канал 12. Измеритель временных интервалов с цифровым отсчетом необходим для измерения амплитуды и длительности сигнала на коллекторе диссектора 9. Длительность этого импульса связана с длительностью светового импульса, регистрируемого электронно-оптическим преобразователем следующим образом:

$$t_g = mv_0 t / v, \quad (1)$$

здесь t_g — длительность импульса на коллекторе 9, m — масштаб переноса изображения с экрана ЭОП на фотокатод 9, v_0 — скорость развертки изображения на экране ЭОП, v — скорость развертки электронного изображения в щелевом диссекторе.

О погрешности измерения. Необходимо проанализировать два вида погрешностей — приборную $\Delta_{\text{п}}$ и случайную $\Delta_{\text{с}}$. Приборная погрешность $\Delta_{\text{п}}$ не превышает 2%. Существенное уменьшение $\Delta_{\text{п}}$ по сравнению с первоначальным вариантом установки [6] достигнуто благодаря применению для калибровки скоростного фоторегистратора измерителя временных интервалов с цифровым отсчетом (И2-17). Основным видом погрешности является случайная $\Delta_{\text{с}}$. Численное значение $\Delta_{\text{с}}$ обусловлено флуктуацией излучения из электронной трубки и флуктуацией коэффициента усиления ЭОП. Для слабых линий $\Delta_{\text{с}} \sim 8-10\%$, для сильных $\sim 5\%$.

Временная калибровка скоростного фоторегистратора осуществлялась с помощью арсенид-галлиевого и фосфид-галлиевого светодиодов, позволяющих формировать световые вспышки наносекундной длительности. Временное разрешение фоторегистратора при исследовании времен жизни уровней Кг II составляло 10^{-10} сек. Это значение не является предельным для нашей аппаратуры. Дальнейшее увеличение временного разрешения пока нецелесообразно, так как длительность среза τ_c , возбуждающего импульса тока в электронной трубке, $\sim 10^{-9}$ сек. Это значение τ_c фактически является предельным для трубок триодной конструкции с оксидным катодом. Осуществить возбуждение атомов исследуемого вещества за более короткое время можно, применив технику пересекающихся пучков. Выполненные оценки показывают, что возможно достигнуть $\tau_c \sim 10^{-11}$ сек. при вполне приемлемых размерах и радиотехнических характеристиках установки.

Результаты измерений

Времена жизни некоторых уровней Кг II измерены при следующих условиях: длительность возбуждающего электронного пучка $5 \cdot 10^{-9}$ сек., длительность среза $\tau_c = 1.5 \cdot 10^{-9}$ сек., плотность тока в импульсе $j_u = 2$ ма/см², давление криптона в электронной трубке $4 \cdot 10^{-3}$ тор. Режим

	$J - J'$	$\lambda, \text{Å}$	$\tau, \text{нсек.}$		
			наши данные	данные других авторов	
Кг II	$5s^2D - 5p^2D^0$	5/2—5/2	4088	3.4±0.5	7.5 [7]
	$5s^4P - 5p^2D^0$	1/2—3/2	4098	5.9±0.4	7.8 [7]
	$5s^4P - 5p^4S^0$	1/2—3/2	4145	6.0±0.4	8.3 [7]
	$5s^4P - 5p^4D^0$	3/2—3/2	4293	7.2±0.6	7.7 [7]
	$6s^2D - 5p^2P^0$	5/2—3/2	4475	6.1±0.6	7.6 [7]
	$5s^4P - 5p^4D^0$	5/2—5/2	4739	5.1±0.5	8.5 [7]
	$4d^4D - 5p^2D^0$	1/2—3/2	4945	5.2±0.5	
Кг I	$5s [1^1/2]^0 - 6p [1^1/2]$	1—0	4376	79±8	87±4 [9]
	$5s [1^1/2]^0 - 6p [1^1/2]$	2—2	4276	172±10	173±9 [9]
	$5s [1^1/2]^0 - 6p [2^1/2]$	2—3	4319	174±10	173±9 [9]

модуляции пучка электронов — разовый запуск, периодически использовался только при юстировке фоторегистратора. На рис. 3 приведена типичная эопограмма слабой линии, полученная в режиме однократного пуска. Результаты измерений представлены в таблице. Увеличение плотности тока j_u до 15 ма/см², а также давления до $4 \cdot 10^{-2}$ тор не влияют на измеряемое значение τ . Интенсивность спектральных линий при этом зависит линейно от указанных параметров, что свидетельствует в пользу отсутствия тушащих соударений. Изменение энергии возбуждающего

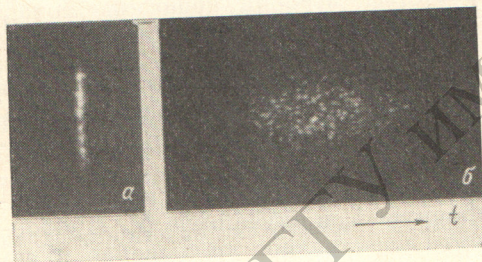


Рис. 3. Эопограммы.

а — спектральная линия Кг II, $\lambda = 4293 \text{ Å}$, длительность излучения 15 нсек., режим запуска — однократный, *б* — однократная линейная развертка этой же линии при $T_r = 15$ нсек. на 2 см экрана. Дискретная структура изображения обусловлена квантовой природой излучения.

пучка от 13 до 25 эв также не влияет на τ . При анализе результатов учитывались такие факторы, как время ухода возбужденных атомов из наблюдаемого объема и время жизни ионов (рекомбинация, уход на стенку). Время ухода атомов из наблюдаемого объема в наших условиях составляло $3 \cdot 10^{-6}$ сек., а время жизни ионов, определяемое их уходом на стенку, равно $1.4 \cdot 10^{-5}$ сек. Таким образом, перечисленные факторы не могли повлиять на τ исследованных уровней. Значения τ для пяти уровней Кг II сравниваются с результатами работы [7], в которой времена жизни измерялись по существу методом Вина [8], но с использованием современной техники получения ионных пучков. Так как в [7] не могло быть селективного возбуждения исследуемого уровня, то каскадное заселение, несомненно, имело место. Этим можно объяснить тот факт, что наши значения τ , полученные в режиме электронной пушки, меньше чем в [7]. Построения кривых затухания измеренных линий в полулогарифмическом масштабе дают прямые линии, т. е. отступление от экспоненциального закона распада не обнаружено. Анализировался участок затухания в пределах от 0.9 до 0.2 от полной амплитуды сигнала. Если вклад каскадов меньше 5%, то он не мог быть надежно выделен экспоненциальным моделирующим устройством 12.

Время жизни уровня $5p^2D^0$ измерялось по затуханию интенсивности двух линий — $\lambda_1 = 4098 \text{ Å}$ и $\lambda_2 = 4945 \text{ Å}$. При этом получены совпадающие значения τ , что свидетельствует о надежности полученных результатов. Измерены τ также для трех уровней Кг I, определенных ранее [9]. Сопоставление наших данных с результатами [9] показывает хорошее совпадение.

Обозначения переходов и длин волн даны по [10]. Следует отметить, что интенсивности спектральных линий, измеренные в режиме электрон-

ной пушки, не только при импульсном возбуждении, но и в режиме постоянного тока, для многих уровней существенно отличаются от интенсивностей, приводимых в [10].

В заключение авторы выражают признательность М. М. Бутслову и М. Я. Щелеву.

Литература

- [1] B. R. Bennett. Advances in Quantum Electronics., ed. by J. R. Singer, N. Y., p. 28, 1961.
- [2] Т. Т. Басиев, Ю. И. Малахов, С. Н. Цысь. Опт. и спектр., 30, 421, 1971.
- [3] М. Я. Щелев. Автореф. канд. диссерт., ФИАН, М., 1969.
- [4] Ю. И. Малахов, В. Г. Потёмкин. Опт. и спектр., 32, 245, 1972.
- [5] Ю. И. Малахов. Тр. МЭИ, радиоэлектроника, вып. 108, 125, 1972; ПТЭ, № 3, 174, 1972.
- [6] Ю. И. Малахов, В. А. Фабрикант. Тр. МЭИ, физика, вып. 94, 5, 1971.
- [7] U. Fink, S. Bashkin, W. S. Bickel. JQSRT, 10, 1241, 1970.
- [8] W. Wien. Ann. d. Phys., 73, 483, 1924.
- [9] А. Л. Ошерович, Я. Ф. Веролайнен. Вестн. ЛГУ, 4, 140, 1967.
- [10] А. Р. Стриганов, Н. С. Свентицкий. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных газов. «Атомиздат», М., 1966.

Поступило в Редакцию 14 июля 1972 г.