АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

НОЯБРЬ, 1981

ВЫПУСК 4

УДК 539.184

ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ УРОВНЕЙ Nd I И Nd II. СИЛЫ ОСЦИЛЛЯТОРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ Nd I

В. Н. ГОРШКОВ, В. А. КОМАРОВСКИЙ, А. Л. ОШЕРОВИЧ, Н. П. ПЕНКИН

Поступила 13 января 1981

Многоканальным методом задержанных совпадений в пересекающихся атомном и электронном пучках измерены времена жизни 33 возбужденных уровней Nd I и 11 уровней Nd II. Полученные значения времен жизни возбужденных уровней Nd I были использованы для перевода в абсолютную шкалу чисел $f_{отн.}$ 116 спектральных линий Nd I, измеренных ранее методом крюков.

Известно (например, [1]), что знание сил осцилляторов спектральных линий и времен жизни (τ) возбужденных состояний атомов и ионов необходимо для решения важнейших астрофизических задач. Эти сведения нужны также при создании лазеров, для совершенствования и контроля теоретических методов расчета атомных констант.

Все вышесказанное в полной мере относится к силам осцилляторов спектральных линий и к значениям величины τ атомов и ионов редкоземельных элементов (РЗЭ) с достраиваемой 4f-оболочкой. В спектрах Солнца и других звезд наблюдаются интенсивные линии РЗЭ с достраиваемой 4f-оболочкой [2—8]. Генерация в лазерах, работающих на парах некоторых РЗЭ, получена на их ионных линиях [9, 10].

Первые работы по определению чисел f для РЗЭ появились только в шестидесятых годах. Начиная с 1967 г., в Физическом институте Ленинградского университета ведутся систематические измерения сил осцилляторов спектральных линий и времен жизни возбужденных уровней атомов и ионов РЗЭ с достраиваемой 4f-оболочкой.

Обзорная работа, в которой приведены силы осцилляторов спектральных линий Nd I, Sm I, Eu I, Gd I, Dy I, Tm I и Yb I, а также времена

жизни возбужденных уровней Eu I, Yb I и Yb II, опубликована в 1976 г. [11]. В более поздних работах представлены результаты измерений чисел f и τ для Tm I и Tm II [12, 13], Sm I [14, 15], Er I [16], Sm II и Eu II [17], Yb I и Yb II [18], Ho I и Ho II [19, 20], Dy I и Dy II [21]. Сводная таблица времен жизни возбужденных уровней атомов и ионов РЗЭ с достраиваемой 4f-оболочкой помещена в сборнике докладов на VI Интернациональной конференции по атомной физике [22].

Настоящая работа является продолжением систематических измерений чисел f и τ атомов и ионов РЗЭ с достраиваемой 4f-оболочкой. Она посвящена измерению времен жизни возбужденных уровней Nd I и Nd II и получению с их помощью сил осцилляторов спектральных линий Nd I. Необходимость таких измерений вызвана тем обстоятельством, что кроме монографии Корлисса и Бозмана [23], в которой приведены значения gf и gA для Nd I и Nd II, имеется всего одна работа [24], в которой методом крюков определены относительные значения чисел f для 116 спектральных линий поглощения Nd I, расположенных в области 5900—4200 Å. При этом следует отметить, что результаты Корлисса и Бозмана часто расходятся в несколько раз с имеющимися достоверными данными [11]. Времена жизни 4 уровней Nd II были впервые измерены методом „пучок—пленка“ в работе [25]. Измерив относительные вероятности всех известных переходов с 9 уровней Nd II, принадлежащих мультиплетным термам $4f^4(^5I)6p^6K^o$ и $4f^4(^5I)6p^6I^o$, и используя значения для четырех уровней, измеренных в работе [25], в [26] определены абсолютные вероятности переходов 60 спектральных линий Nd II. При этом предполагалось, что в исследуемых мультиплетных атомах распределены равномерно при известной температуре. Полученные вероятности переходов позволили авторам [26] определить времена жизни 5 уровней Nd II. В работах [25, 26] полученные времена жизни были использованы для определения концентрации неодима в фотосфере Солнца и метеоритах.

В настоящей работе многоканальным методом задержанных совпадений в пересекающихся атомном и электронном пучках были измерены времена жизни 33 возбужденных уровней Nd I, расположенных в области энергий 17700—25700 см^{-1} и 11 уровней Nd II, принадлежащих к мультиплетным термам $4f^4(^5I)6p^6K^o$ и $4f^4(^5I)6p^6I^o$, переходы с которых на уровни основного $4f^4 6s^0I$ терма дают наиболее сильные линии. Измерения проводились с помощью экспериментальной установки, подробно описанной в работах [27, 28].

В наших экспериментах измерения времен жизни возбужденных уровней производились по спектральным линиям, оканчивающимся на уровнях, принадлежащих основным термам Nd I и Nd II, поэтому необходимо было изучить влияние пленения излучения на измеряемые времена жизни. С

ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ УРОВНЕЙ Nd I

λ (Å)	Переход (см ⁻¹)	Конфигурация верхнего уровня	Терм	J	τ (нс)
5620.54	0—17787	$4f^3(^4F^o)5d6s^2$	$^5H^o$	3	78±6
5675.92	1128—18741	$4f^3(^4F^o)5d6s^2$	$^5H^o$	4	85±7
5103.13	0—19590			4	220±30
5074.49	0—19700			5	300±25
5056.85	0—19770			4	130±3
5729.29	2367—19816	$4f^3(^4F^o)5d6s^2$	$^5H^o$	5	91±3
4954.78	0—20177			5	34±3
4924.53	0—20301	$4f^46s6p$	$^5K^o$	5	11±1
4910.05	0—20361	$4f^46s6p$	$^5F^o$	4	86±3
5149.55	1128—20542			5	
4866.74	0—20542				79±5
5040.17	1128—20963			5	164±11
5029.42	1128—21005	$4f^46s6p$	$^5F^o$	5	98±8
4719.02	0—21184			4	30±3.5
4690.35	0—21314			4	71±8
4944.83	1128—21346			6	
4683.45	0—21346				23±3
4652.39	0—21488			4	114±7
4896.93	1128—21543	$4f^56s6p$	$^5K^o$	6	17±1
4637.20	0—21559			5	64±4
4634.24	0—21572	$4f^46s6p$	$^5H^o$	3	12±1
4836.62	1128—21797			6	85±3
4806.62	1128—21927			4	88±2
4542.06	0—22010			4	98±5
4497.40	0—22229			3	180±20
4731.77	1128—22256			5	36±3
4706.95	1128—22367			5	45±3
4444.99	0—22491			3	84±7
4654.73	1128—22606			5	46±2
4567.61	1128—23016			4	
4343.50	0—23016				88±12
4779.46	2367—23283			6	34±3
4256.47	0—23487			3	102±7
4456.13	1128—23562			4	90±3
4621.94	2367—23996			6	20±1.5
4891.07	3682—24121	$4f^46s6p$	$^5K^o$	8	14.5±0.5
4883.81	5048—25518	$4f^46s6p$	$^5K^o$	9	11±1
4749.75	3682—24730			7	37±4
4586.62	3682—25478			6	24±3
4311.25	2367—25555			5	55±2
4548.24	3682—25662			6	54±2

этой целью для двух наиболее сильных линий Nd I ($\lambda = 4924$ и $4634 \text{ \AA}$) проводились измерения τ при различных температурах источника атомного пучка. Было обнаружено, что при изменении концентрации атомов в пучке почти на два порядка значения τ исследуемых уровней в пределах ошибок измерений оставались постоянными, что указывало на малую роль пленения излучения.

В табл. 1 приведены измеренные нами времена жизни возбужденных уровней Nd I. Часть исследованных уровней принадлежит конфигурациям $4f^4 6s 6p$ и $4f^3 5d 6s^2$. Для большинства остальных уровней принадлежность к электронным конфигурациям в настоящее время неизвестна. Уровни 20542 , 21346 и 23016 см^{-1} исследовались по двум переходам. Соответствующие длины волн отмечены в таблице фигурными скобками.

Времена жизни возбужденных уровней Nd I, полученные в настоящей работе, были использованы для перевода в абсолютную шкалу относительных значений сил осцилляторов спектральных линий атома неодима, измеренных методом крюков в работе [24]. При этом учитывались другие переходы с исследуемого уровня на уровни основного $4f^4 6s^2 5I$ -терма, для которых в работе [24] были измерены числа $f_{\text{отн.}}$.

В табл. 2 приведены силы осцилляторов 116 спектральных линий поглощения Nd I, полученные в результате перевода относительных чисел f в абсолютную шкалу. Все эти линии возникают при переходах с различных уровней основного $4f^4 6s^2 5I$ -состояния атома в возбужденные.

Измеренные в настоящей работе времена жизни 5 уровней терма $4f^4 ({}^3I) 6p^0 K^0$ и 6 уровней терма $4f^4 ({}^3I) 6p^0 I^0$ Nd II приведены в четвертом столбце табл. 3. В пятом столбце для сравнения помещены значения τ , измеренные в работе [25] методом „пучок—пленка“. В последнем столбце табл. 3 приведены времена жизни, рассчитанные с учетом значений вероятностей переходов [26]. Как видно из этой таблицы, наши данные хорошо согласуются с результатами измерений работы [25]. Однако для уровней $4f^4 ({}^3I) 6p^0 I^0$ $11/2$, $15/2$, $17/2$ наблюдаются значительные расхождения с результатами работы [26]. Они по-видимому, связаны с тем, что в этой работе систематически завышены значения вероятностей переходов для спектральных линий, возникающих с уровней мультиплетного терма $4f^4 ({}^3I) 6p^0 I^0$.

В заключение следует отметить, что в исследованных нами термах $4f^3 (4F^o) 5d 6s^2 5H^o$, $4f^4 6s 6p^5 K^o$ Nd I и $4f^4 ({}^3I) 6p^0 K^o$, $4f^4 ({}^3I) 6p^0 I^o$ Nd II времена жизни уровней одного терма данной электронной конфигурации имеют близкие значения. Это обстоятельство очень важно для оценки величины τ тех уровней, измерение времен жизни которых по каким-либо причинам представляется затруднительным.

Погрешность наших измерений времен жизни возбужденных уровней Nd I и Nd II, приведенная в табл. 1 и 3, соответствует довери-

СИЛЫ ОСЦИЛЛЯТОРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ № I

λ (А)	Переход (см ⁻¹)	$f \times 10^2$	λ (А)	Переход (см ⁻¹)	$f < 10^2$
1	2	3	1	2	3
5887.91	0—16979	1.3	4975.50	5048—25141	13
5869.62	0—17032	0.71	4969.75	2367—22482	5.1
5839.09	1128—18249	1.0	4963.33	5048—25190	10
5826.74	3682—20839	2.0	4954.78	0—20177	13
5788.22	5048—22320	6.5	4952.46	1128—21314	3.0
5784.96	2367—19648	1.1	4944.83	1128—21345	20
5776.12	1128—18436	2.2	4924.53	0—20301	40
5772.15	0—17319	0.50	4910.05	0—20361	3.4
5749.66	0—17387	1.2	4896.93	1128—21543	25
5726.29	2367—19816	5.1	4893.23	1128—21559	3.9
5675.97	1128—18741	4.3	4891.07	3682—24121	29
5669.77	3682—21314	5.0	4885.01	5048—25513	10
5620.54	0—17787	4.2	4883.81	5048—25518	35
5561.17	0—17977	1.3	4881.70	0—20478	1.2
5529.07	1128—19209	0.75	4879.79	3682—24168	10
5377.79	0—18589	1.9	4875.73	2367—22870	1.5
5349.58	1128—19816	1.0	4869.27	3682—24213	3.9
5336.81	0—18732	1.5	4866.74	0—20542	3.9
5334.33	0—18741	0.75	4859.58	2367—22938	4.8
5298.88	1128—19994	2.2	4855.31	1128—21718	2.8
5284.33	1128—20046	2.4	4853.33	1128—21727	2.8
5204.38	0—19209	1.9	4836.62	1128—21797	3.0
5199.72	0—19226	1.7	4835.66	2367—23040	3.6
5198.07	1122—20361	1.9	4806.62	1128—21927	2.9
5149.55	1128—20542	3.0	4792.62	0—20859	0.77
5103.11	0—19590	3.4	4787.40	1128—22010	1.0
5074.52	0—19700	1.4	4779.46	2367—23283	8.8
5071.87	1128—20839	3.0	4778.40	1128—22049	1.3
5060.94	2367—22123	4.0	4772.26	1128—22076	2.0
5056.89	0—19770	2.9	4770.20	2367—23324	5.2
5051.06	3682—23474	5.3	4760.45	1128—22129	1.9
5040.20	1128—20963	2.4	4159.34	0—21005	0.84
5029.45	1128—21005	3.5	4758.50	0—21009	0.90
5027.15	5048—24925	9.5	4755.85	3682—24703	6.7
5014.55	2367—22303	4.0	4749.75	3682—24730	9.0
4988.64	2367—22406	7.2	4731.77	1128—22256	8.6
4982.89	3682—23744	4.5	4726.55	2367—23517	2.9

Таблица 2 (окончание)

1	2	3	1	2	3
4719.02	0-21184	11	4586.62	3682-25478	11
4713.04	2367-23578	2.5	4567.34	1128-23016	1.9
4706.96	1128-22367	7.4	4560.42	1128-23049	2.4
4696.44	3682-24968	7.0	4548.24	3682-25662	5.0
4690.35	0-21314	4.2	4542.06	0-22010	2.4
4583.45	0-21346	17	4529.94	3682-25750	6.7
4675.52	3682-25064	3.0	4527.25	5048-27131	9.0
4673.97	2367-23756	2.8	4501.95	3682-25887	3.5
4671.10	1128-22530	2.6	4497.40	0-22228	1.3
4654.73	1128-22606	7.0	4481.90	1128-23434	2.8
4652.39	0-21488	1.7	4480.97	1128-23438	4.5
4646.40	3682-25197	7.5	4477.88	5048-27374	10
4644.96	2367-23889	1.9	4475.84	2367-24703	1.7
4639.14	1128-22678	3.2	4456.13	1128-23562	2.8
4637.20	0-21559	1.4	4444.99	0-22491	2.4
4634.24	0-21572	21	4402.46	2367-25074	2.3
4627.98	2367-23968	5.6	4343.50	0-23016	1.8
4626.50	1128-22737	2.4	4311.25	2367-25555	3.4
4624.21	2567-23985	1.9	4305.81	0-23217	0.73
4621.94	2367-23996	18	4258.11	1128-24605	0.78
4594.68	2367-24124	5.2	4256.47	0-23487	1.8

Таблица 3

ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ УРОВНЕЙ Nd II
ТЕРМ $4f^4(^5I) 6p^6K^{\circ}$

λ (Å)	Переход (см ⁻¹)	J	τ (нс)		
			н. р.	[25]	[26]
4303.58	0-23230	9/2	13±2	13±3	
4156.08	1470-25524	13/2	12±1		10.7
4109.46	2585-26913	15/2	13±2		10.3
4061.09	3802-28419	17/2	12±2	13±3	
4012.25	5086-30002	19/2	10±1.5		

ТЕРМ $4f^4(^5I) 6p^6I^{\circ}$

3991.70	0-25045	7/2	14±3		
3863.33	0-25877	9/2	13±2	10±3	
3951.16	1470-26772	11/2	17±2		7.6
4051.15	3067-27744	13/2	10±1		
3805.36	2585-28856	15/2	20±5		9.7
3973.30	5086-30247	17/2	19±2		9.6

тельной вероятности 0.95. Коэффициенты вариации чисел f спектральных линий Nd I (табл. 2) зависят от погрешности измерений относительных чисел f и ошибок измерений времен жизни возбужденных уровней. Суммарная максимальная ошибка не превышает 25 %.

Ленинградский государственный
университет

LIFETIMES OF THE EXCITED LEVELS Nd I AND Nd II. OSCILLATOR STRENGTHS OF SPECTRAL LINES Nd I.

V. N. GORSHKOV, V. A. KOMAROVSKII, A. L. OSHEROVICH, N. P. PENKIN

Lifetimes of the 33 excited levels Nd I and 11 levels Nd II have been measured using a method of delayed coincidence. These values of lifetimes of levels Nd I were used in order to transfer to the absolute scale f_{rel} for 116 spectral lines Nd I measured before by the hook method.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Blemont, N. Grevesse, Phys. Scripta, 16, 39, 1977.
2. О. А. Мельников, Доклады и сообщения на совещании, посвященном измерению и вычислению сил осцилляторов в спектрах атомов, Ленинград, 1959.
3. N. Grevesse, G. Blanguet, Solar Physics, 8, 5, 1969.
4. O. Engvold, O. Hange, Nucl. Instr. Meth., 90, 351, 1970.
5. L. Molnar, Astron. Astrophys., 20, 69, 1972.
6. B. E. J. Pagel, Space Sci. Rev., 15, 1, 1973.
7. A. G. W. Cameron, Space Sci. Rev., 15, 121, 1973.
8. Н. Н. Степанян, Э. А. Щербакова, Изв. Крымской обл., 58, 3, 1978.
9. В. М. Климкин, Кандидатская диссертация, Томск, 1973.
10. П. А. Бохан, В. М. Климкин, В. П. Прокопьев, Квантовая электроника, 1, 1365, 1964.
11. Н. П. Пенкин, В. А. Комаровский, J. Q. S. R. T., 16, 217, 1976.
12. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин, Оптика и спектроскопия, 40, 622, 1976.
13. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин, Оптика и спектроскопия, 44, 224, 1978.
14. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Оптика и спектроскопия, 42, 407, 1977.
15. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин, Оптика и спектроскопия, 42, 424, 1977.
16. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Оптика и спектроскопия, 42, 594, 1977.
17. К. Б. Благогов, М. Л. Бурштейн, Я. Ф. Веролайнен, В. А. Комаровский, А. Л. Ошерович, Н. П. Пенкин, Оптика и спектроскопия, 44, 32, 1978.
18. К. Б. Благогов, В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин, Оптика и спектроскопия, 45, 1024, 1978.
19. К. Б. Благогов, А. К. Валтер, В. А. Комаровский, Оптика и спектроскопия, 45, 1198, 1978.

20. В. Н. Горшков, В. А. Комаровский, Оптика и спектроскопия, 47, 631, 1979.
21. В. Н. Горшков, В. А. Комаровский, А. Л. Ошерович, Н. П. Пенкин, Р. Хэффэрлин, Оптика и спектроскопия, 48, 657, 1980.
22. N. P. Penkin, 6-th International Conference on Atomic Physics Proceedings, Riga, 1978.
23. Ч. Корлисс, У. Бозман, Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов, 1968.
24. Н. П. Пенкин, В. А. Комаровский, Оптика и спектроскопия, 35, 8, 1973.
25. T. Andersen, O. Poulsen, P. S. Ramanujam, Potraktev Petkov, Solar Physics, 44, 257, 1975.
26. R. S. Maier, W. Whaling, J. Q. S. R. T., 18, 501, 1977.
27. А. Л. Ошерович, М. Л. Бурштейн, Я. Ф. Веролайнен, А. Я. Николаич, ПТЭ, № 6, 210, 1975.
28. А. Л. Ошерович, А. Я. Николаич, Оптика и спектроскопия, 46, 639, 1979.