

СИЛЫ ОСЦИЛЛЯТОРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ
ЛИНИЙ АТОМА ТУЛИЯ

К. Б. Благогов, В. А. Комаровский и Н. П. Пенкин

Методом крюков Рождественского измерены относительные значения сил осцилляторов 31 спектральной линии атома тулия, возникающих при переходах с основного $4f^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}^0$ уровня Тm I. Используя высокочастотный разряд для заселения нижних возбужденных уровней атома тулия, тем же методом определены относительные значения сил осцилляторов 80 наиболее сильных линий поглощения Тm I, возникающих при переходах с уровней 8771, 13 149, 15 271, 15 587 и 16 456 см^{-1} . Относительные числа f спектральных линий поглощения, начинающихся с $4f^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}^0$ уровней Тm I, переведены в абсолютную меру с помощью данных по временам жизни возбужденных состояний атома тулия, полученных Валленштейном методом пересечения уровней.

В 1973 г. вышла обзорная статья [1], в которой приведены энергетические уровни атома тулия и дана подробная классификация спектральных линий Тm I в области 12 000–2500 Å. Эта работа позволила нам продолжить измерения сил осцилляторов спектральных линий Тm I, которые были начаты нами в 1969 г. [2].

Как и в предыдущей работе [2], для измерения сил осцилляторов спектральных линий атома тулия мы использовали метод крюков Рождественского [3]. Столб паров тулия создавался в кварцевой трубке, в которую в танталовой лодочке помещались кусочки металлического тулия. Кварцевая трубка нагревалась с помощью трубчатой электрической печи сопротивления Т-40-600. Температура в середине печи измерялась при помощи хромель-алюмелевой термопары. Интервал рабочих температур был от 1100 до 1400 К. Во время съемки спектрограмм температура печи поддерживалась постоянной. Крюки около линий поглощения фотографировались с помощью спектрографа с плоской дифракционной решеткой (1200 штр./мм) и вогнутым сферическим зеркалом ($F=2$ м). Съемка спектрограмм проводилась в первом порядке решетки, где величина обратной дисперсии составляла ≈ 4 Å/мм.

В табл. 1 приведены силы осцилляторов спектральных линий Тm I, возникающих при переходах из основного $4f^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}^0$ состояния атома тулия.

Спектральные линии, отмеченные в табл. 1 одной звездочкой, отсутствуют в работе [1]. Их длины волн были нами измерены и линии классифицированы. Для некоторых из них указаны электронные конфигурации верхних уровней, взятые из работы [1], для других — только энергия верхних уровней, определенная нами. Спектральные линии, отмеченные двумя звездочками, приведены в работе [1], но их классификация там отсутствует. Эти линии отнесены нами к линиям, возникающим при переходах из основного состояния атома тулия. Это можно было сделать однозначно, так как в условиях нашего эксперимента могли появляться только линии, возникающие при переходах с основного $4f^{13}6s^2\ ^2F_{7/2}^0$ уровня атома тулия. В третьей колонке табл. 1 приведены относительные числа f спектральных линий поглощения Тm I. Как и в предыдущей нашей работе [2], сила осциллятора линии $\lambda=4105.84$ Å принята за 1000.

Таблица 1

Силы осцилляторов спектральных линий Тm I. Переходы с основного уровня $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}^0$

$\lambda, \text{Å}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$	$f_{\text{абс.}} \times 10^2$
5062.25	$4f^{13}6s6p$ 19748 _{9/2}	1.5	0.028
4105.84	$4f^{12}5d6s^2$ 24349 _{9/2}	1000	19
3107.15	$4f^{12}5d6s^2$ 32174 _{5/2}	11	0.21
2907.17 *	34387	9.4	0.18
2854.17	$4f^{12}5d6s^2$ 35026 _{5/2}	130	2.5
2835.10	$4f^{13}6s6p$ 35262 _{5/2}	6.2	0.12
2826.69 **	35367	3.4	0.065
2752.18 **	36324	3.5	0.066
2660.42	$4f^{13}6s6p$ 37577 _{9/2}	3.8	0.072
2650.95	$4f^{13}6s6p$ 37711 _{9/2}	3.1	0.059
2622.47	$4f^{12}5d6s^2$ 38121 _{9/2}	41	0.78
2621.94	$4f^{12}5d6s^2$ 38128 _{5/2}	3.0	0.057
2614.61 *	38235	6.6	0.12
2607.35 *	38342	3.9	0.074
2601.09	$4f^{13}5d6p$ 38434 _{5/2}	67	1.3
2596.49	$4f^{13}5d6p$ 38502 _{1/2}	105	2.0
2583.43 *	$4f^{13}5d6p$ 38697 _{5/2}	16	0.31
2562.05 *	39019	2.9	0.055
2555.22 *	$4f^{13}5d6p$ 39123 _{1/2}	4.1	0.078
2552.76	$4f^{13}5d6p$ 39161 _{3/2}	206	3.9
2549.81	$4f^{13}5d6p$ 39207 _{9/2}	20	0.38
2546.36 *	$4f^{13}5d6p$ 39260 _{1/2}	4.3	0.082
2527.88 *	$4f^{13}5d6p$ 39547 _{5/2}	28	0.54
2527.02	$4f^{12}5d6s^2$ 39560 _{7/2}	85	1.6
2525.72 **	39581	19	0.36
2513.78	$4f^{12}5d6s^2$ 39769 _{9/2}	43	0.82
2508.82 *	$4f^{13}5d6p$ 39847 _{7/2}	4.4	0.084
2499.45 *	$4f^{13}5d6p$ 39996 _{7/2}	18	0.35
2492.89 *	$4f^{13}5d6p$ 40102 _{9/2}	3.6	0.068
2476.87 *	$4f^{13}5d6p$ 40360 _{7/2}	6.9	0.13
2459.25 *	$4f^{13}5d6p$ 40649 _{7/2}	16	0.31

Валленштейн [4] методом пересечения уровней измерил времена жизни 14 уровней Тm I. При этом в относительной мере наблюдалось хорошее согласие между временами жизни, вычисленными из измеренных нами чисел f [2], и результатами работы [4]. Время жизни уровня $18\ 838\ \text{см}^{-1}$, равное $\tau = 4.5 \cdot 10^{-7}$ с, с которого имеется единственный переход в основное состояние $^2F_{7/2}^0$ ($\lambda = 5307\ \text{Å}$), мы использовали для пересчета относительных чисел f в абсолютную шкалу. Результаты пересчета представлены в последнем столбце табл. 1.

Для того чтобы исследовать линии поглощения Тm I, возникающие с нижних возбужденных уровней, в абсорбционной трубке с парами тулия зажигался высокочастотный разряд. При этом в трубку добавлялся аргон при давлении $10 \div 15$ тор. Разрядная трубка питалась от высокочастотного генератора ВГ-5 ($\nu = 1760$ кГц). При наличии высокочастотного разряда происходило дополнительное заселение нижних возбужденных уровней, и мы могли сфотографировать хорошо измеримые крюки около линий Тm I, возникающих при переходах со второго уровня нормальной конфигурации $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}^0$ с энергией $8771\ \text{см}^{-1}$, а также с уровней $13\ 119, 15\ 271, 15\ 587$ и $16\ 456\ \text{см}^{-1}$, принадлежащих конфигурации $4f^{12}5d6s^2$.

На рис. 1 приведена схема расположения электронных конфигураций атома тулия, построенная по данным работы [1]. Верхний и нижний концы каждого столбика означают границы расположения известных

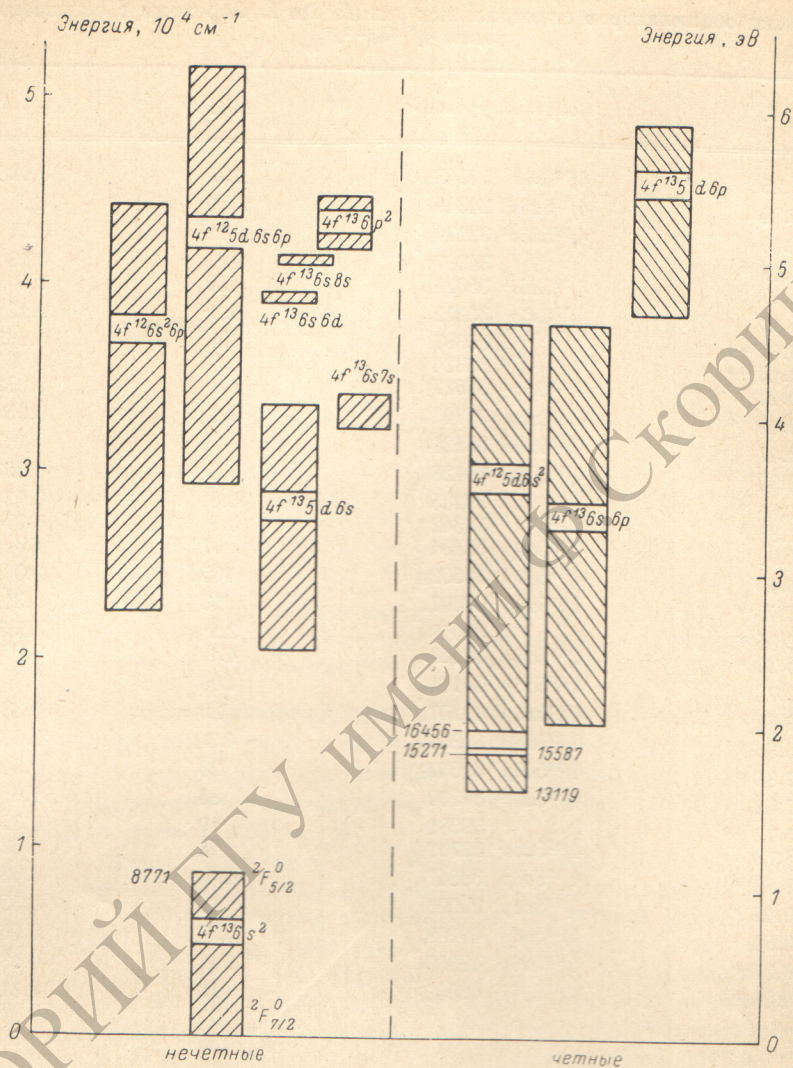


Рис. 1. Схема расположения электронных конфигураций атома тулия.

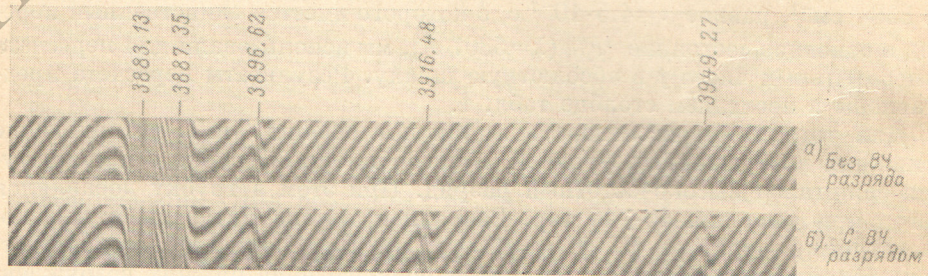


Рис. 2. Фотография крюков около линий поглощения Тм I в области $3880 \div 3950 \text{ \AA}$.
а — без высокочастотного разряда, б — с высокочастотным разрядом.

Таблица 2

Силы осцилляторов спектральных линий Tm I. Переходы с уровня $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{5/2}^0$ (8771 см^{-1})

$\lambda, \text{ \AA}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$	$f_{\text{абс.}}$
5899.47	$4f^{12}5d6s^2 \ 25717_{7/2}$	12	0.015
5760.20	$4f^{13}6s6p \ 26126_{5/2}$	15	0.019
5658.30	$4f^{13}6s6p \ 26439_{7/2}$	15	0.019
5642.60	$4f^{13}6s6p \ 26488_{3/2}$	9.5	0.012
5185.25	$4f^{12}5d6s^2 \ 28051_{5/2}$	7.0	0.009
5160.54	$4f^{13}6s6p \ 28143_{3/2}$	3.4	0.004
4691.11	$4f^{12}5d6s^2 \ 30082_{5/2}$	28	0.035
4681.92	$4f^{12}5d6s^2 \ 30124_{7/2}$	39	0.050
4643.12	$4f^{12}5d6s^2 \ 30302_{5/2}$	24	0.030
4396.49	$4f^{12}5d6s^2 \ 31510_{7/2}$	31	0.039
4394.42	$4f^{12}5d6s^2 \ 31520_{3/2}$	48	0.061
4271.72	$4f^{12}5d6s^2 \ 32174_{5/2}$	65	0.082
4222.67	$4f^{12}5d6s^2 \ 32446_{7/2}$	116	0.15
4158.60	$4f^{12}5d6s^2 \ 32811_{7/2}$	43	0.055
4138.33	$4f^{12}5d6s^2 \ 32928_{3/2}$	265	0.34
4044.47	$4f^{12}5d6s^2 \ 33489_{3/2}$	105	0.13
4022.59	$4f^{12}5d6s^2 \ 33623_{7/2}$	28	0.035
3949.27	$4f^{13}6s6p \ 34085_{5/2}$	540	0.69
3916.48	$4f^{13}6s6p \ 34297_{7/2}$	1000	1.3
3807.72	$4f^{12}5d6s^2 \ 35026_{5/2}$	190	0.24
3798.54	$4f^{13}6s6p \ 35089_{3/2}$	300	0.38
3418.62	$4f^{12}5d6s^2 \ 38014_{3/2}$	45	0.057
3405.97	$4f^{12}5d6s^2 \ 38123_{7/2}$	75	0.095
3380.69	$4f^{12}5d6s^2 \ 38342_{7/2}$	81	0.10
3251.78	$4f^{12}5d6s^2 \ 39514_{3/2}$	122	0.15
3246.96	$4f^{12}5d6s^2 \ 39560_{7/2}$	140	0.18
3142.43	$4f^{13}5d6p \ 40584_{5/2}$	30	0.038
3122.53	$4f^{12}5d6s^2 \ 40787_{5/2}$	170	0.22
2841.12	$4f^{13}5d6p \ 43958_{3/2}$	53	0.067

уровней, принадлежащих к соответствующей конфигурации. На этой схеме отмечены также уровни, при переходах с которых наблюдались линии поглощения в нашем эксперименте.

На рис. 2 (а и б) в качестве примера представлены фотографии крюков около линий поглощения Tm I в области $3880 \div 3950 \text{ \AA}$, снятые при одной и той же температуре. На первом снимке приведена интерферограмма без разряда, а на втором — с разрядом. Полученные интерферограммы позволили измерить относительные числа f спектральных линий Tm I, возникающих с вышеуказанных уровней.

Результаты измерений представлены в табл. 2—6. Числа f , приведенные в каждой таблице, имеют свою шкалу, в которой сила осциллятора одной из линий принята за 1000.

Чтобы определить абсолютные значения сил осцилляторов спектральных линий, возникающих при переходах с уровня $^2F_{5/2}^0$ нормальной конфигурации $4f^{13}6s^2$, необходимо знать отношение концентраций атомов на уровнях $^2F_{7/2}^0$ и $^2F_{5/2}^0$. Нами при температуре $T_{\text{эфф.}} = 1380 \text{ K}$ были получены интерферограммы с крюками около самой сильной линии $\lambda = 3916 \text{ \AA}$, возникающей при переходе с уровня $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{5/2}^0$ ($8771 \div 34\,297 \text{ см}^{-1}$), без использования высокочастотного разряда. Отношение концентраций на уровнях $^2F_{7/2}^0$ и $^2F_{5/2}^0$ можно было вычислить по формуле Больцмана. В последнем столбце табл. 2 приведены $f_{\text{абс.}}$ спектральных линий поглощения,

Таблица 3

Относительные значения сил осцилляторов спектральных линий Tm I. Переходы с уровня $4f^{125}d6s^2 13119_{9/2} \text{ см}^{-1}$

$\lambda, \text{ \AA}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$
4685.11	$4f^{125}d6s6p 34457_{9/2}$	140
4298.36	$36377_{9/2}$	170
4055.81	$37768_{9/2}$	150
3791.31	$39488_{9/2}$	120
3759.82	$39709_{11/2}$	140
3675.03	$40322_{1/2}$	150
3648.85	$40517_{9/2}$	250
3646.70	$40533_{7/2}$	620
3638.41	$40596_{7/2}$	1000
3575.29	$41081_{11/2}$	390
3569.80	$41124_{1/2}$	380
3519.43	$41525_{1/2}$	290
3513.13	$41576_{9/2}$	230
3487.38	$41786_{9/2}$	1500
3476.69	$41874_{11/2}$	930
3447.35	$42119_{9/2}$	480
3445.67	$42138_{1/2}$	300
3417.69	$42370_{1/2}$	300
3397.87	$42541_{11/2}$	560
3393.19	$42581_{11/2}$	550
3363.78	$4f^{136}87s 42839_{1/2}$	200
3349.99	$4f^{125}d6s6p 42961_{11/2}$	860
3324.98	$43186_{11/2}$	210
3296.30	$43447_{11/2}$	320
3271.78	$43675_{9/2}$	260

возникающих при переходах с уровня $4f^{136}8s^2 2F_{3/2}^0$, полученные в результате наших измерений.

Относительная погрешность измерений чисел $f_{\text{отн.}}$, представленных в табл. 1—6, не превышает 10%. Ошибка измерений $f_{\text{абс.}}$ спектральных линий Tm I, значения для которых были получены с помощью данных по временам жизни возбужденных уровней, кроме погрешности измерений расстояния между вершинами крюков, включает в себя погрешность измерения времени жизни уровня $18\ 839 \text{ см}^{-1}$, которая, по оценке автора [4],

Таблица 4

Переходы с уровня $4f^{125}d6s^2 15\ 271_{15/2} \text{ см}^{-1}$

$\lambda, \text{ \AA}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$
3840.87	$4f^{125}d6s6p 41299_{17/2}$	1000
3624.20	$42856_{15/2}$	1300
3598.62	$43051_{15/2}$	990
3549.21	$43438_{13/2}$	810
3527.17	$43614_{15/2}$	690
3454.50	$44210_{15/2}$	850
3442.99	$44307_{13/2}$	1200
3412.59	$44565_{15/2}$	2000

Таблица 5

Переходы с уровня $4f^{12}5d6s^2 15587_{11/2} \text{ см}^{-1}$

$\lambda, \text{ \AA}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$
3802.07	$4f^{12}5d6s6p 41881_{9/2}$	1000
3701.80	$42594_{9/2}$	700
3677.73	$42770_{9/2}$	710
3652.05	$42961_{11/2}$	790
3642.94	$43030_{9/2}$	1150
3590.72	$43429_{9/2}$	1500
3480.97	$44307_{13/2}$	3000
3467.51	$44418_{13/2}$	3100
3428.47	$44747_{11/2}$	2100
3421.79	$44803_{13/2}$	1800
3307.82	$45810_{11/2}$	2000

Таблица 6

Переходы с уровня $4f^{12}5d6s^2 16456_{17/2} \text{ см}^{-1}$

$\lambda, \text{ \AA}$	Конечный уровень	$f_{\text{отн.}}$
3787.01	$4f^{12}5d6s6p 42856_{15/2}$	1000
3602.12	$44210_{15/2}$	700
3586.07	$44334_{19/2}$	2400
3556.57	$44565_{15/2}$	970
3555.82	$44571_{17/2}$	2100
3435.35	$45557_{15/2}$	2300
3429.33	$45608_{15/2}$	2900

составляет несколько процентов. Кроме того, погрешность измерений чисел $f_{\text{абс.}}$, представленных в табл. 2, увеличивается еще на 30% за счет ошибок измерений температуры поглощающего столба паров тулия.

Литература

- [1] J. Sugar, W. F. Meggers, P. Camus. J. Res. NBS, 77A, 1, 1973.
- [2] В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин. Опт. и спектр., 26, 882, 1969.
- [3] Н. П. Пенкин. Спектроскопия газоразрядной плазмы. Л., 1970.
- [4] R. Wallenstein. Z. Phys., 251, 57, 1972.

Поступило в Редакцию 27 мая 1975 г.