

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СИЛ
ОСЦИЛЛЯТОРОВ ЛИНИЙ SnI И ОЦЕНКА
СВЕРХТОНКОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ УРОВНЕЙ $5^3 D_1^0$, $6^3 P_2^0$
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ
ЛИНЕЙЧАТОГО ПОГЛОЩЕНИЯ**

В. Г. Мурадов

В условиях термодинамического равновесия жидкий металл—насыщенный пар олова измерены величины линейчатой абсорбции (A) линий SnI 286.3, 270.6, 284.0 и 224.6 нм. Проанализированы рассчитанные зависимости A от оптической толщины поглощающего слоя с учетом их сверхтонкой структуры. Найденные значения относительных сил осцилляторов исследованных линий SnI согласуются с литературными данными, что позволило оценить сверхтонкое расщепление уровней атомов олова $5^3 D_1^0$ и $6^3 P_2^0$.

Естественное олово имеет достаточно сложный изотопный состав [1]. Наличие нечетных изотопов Sn^{115} , Sn^{117} и Sn^{119} с одинаковым ядерным моментом $1/2$, несмотря на сравнительно малое их процентное содержание в природном олове, обуславливает сверхтонкую структуру (СТС) многих спектральных линий SnI. Поэтому при определении относительных значений сил осцилляторов ($f_{\text{отн.}}$) линий атомов олова методом линейчатого поглощения требуется корректный учет СТС. Кроме того, существование у SnI двух метастабильных уровней $5^3 P_{1,2}$, расположенных достаточно близко к основному $5^3 P_0$, обязывает учитывать изменение заселенности нижних состояний атомов олова с температурой, вводя соответствующую поправку в расчеты $f_{\text{отн.}}$.

В настоящей работе приведены результаты определения относительных значений сил осцилляторов линий SnI 286.3, 270.6, 284.0 и 224.6 нм [2], полученные методом линейчатого поглощения в условиях термодинамического равновесия насыщенный пар—жидкое олово, когда справедлив закон Больцмана. За основу расчета взята методика, описанная автором в работе [3].

С помощью источника сплошного спектра ДВС-25 доказано отсутствие молекулярного фона поглощения в области исследуемых линий SnI.

С учетом термической заселенности уровней $5^3 P_1$ (0.21 эВ) и $5^3 P_2$ (0.425 эВ) расчетные формулы для определения относительных значений сил осцилляторов следующих пар линий SnI запишутся в виде

$$\frac{f_{1^{286.3 \text{ нм}}}^2}{f_{2^{270.6 \text{ нм}}}^2} = \left(\frac{k_{01}}{k_{02}} \right) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \frac{1}{K_1}, \quad (1)$$

где

$$K_1 = \left[\frac{1}{3} \exp\left(\frac{2435}{T}\right) - 1 - \frac{5}{3} \exp\left(-\frac{2493}{T}\right) \right]; \quad (2)$$

$$\frac{f_{1^{286.3 \text{ нм}}}^2}{f_{3^{284.0 \text{ нм}}}^2} = \left(\frac{k_{01}}{k_{03}} \right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_1} \right) \frac{1}{K_2}, \quad (3)$$

где

$$K_2 = \left[\frac{1}{5} \exp\left(\frac{4927.5}{T}\right) - \frac{3}{5} \exp\left(\frac{2493}{T}\right) - 1 \right]; \quad (4)$$

$$\frac{f_{\lambda}^{286.3 \text{ нм}}}{f_{\lambda}^{224.6 \text{ нм}}} = \left(\frac{k_{01}}{k_{04}} \right) \left(\frac{\lambda_4}{\lambda_1} \right). \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) k_{01} , k_{02} , k_{03} , k_{04} — коэффициенты поглощения в центре доплеровских линий соответственно с длиной волны λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 ; T , K — температура поглощающего слоя насыщенного пара олова.

Для определения значений k_{0i} по измеренным величинам абсорбции (A_i) необходимо рассчитать функциональные зависимости $A_i = f(k_{0i}l)$ с учетом СТС линий SnI. Здесь l — толщина поглощающего слоя. Если пренебречь изотопическим сдвигом и небольшим различием в величине константы сверхтонкого расщепления (a) изотопов Sn¹¹⁵, Sn¹¹⁷, Sn¹¹⁹, то легко показать, что уровни $5^3P_{1,2}$, $6^3P_{1,2}^0$ и $5^3D_1^0$ состоят каждый из трех подуровней, из которых два смещенных принадлежат трем нечетным, а третий несмещенный — семи четным изотопам олова. Величины a известны только для состояний $5^3P_{1,2}$ и $6^3P_1^0$ [4].

Покажем, что недостающие сведения о величине a для уровней $6^3P_2^0$ и $5^3D_1^0$ можно приближенно получить на основе анализа зависимостей $A = f(k_0l)$ для определенных линий SnI. Прежде всего отметим, что искомая зависимость поглощения от оптической толщины поглощающего слоя x ($x \equiv k_0l$) обязательно должна находиться между граничными кривыми $A = f(x)$, относящимися к крайним случаям: простой линии и полностью разделенным компонентам СТС. Зависимость $A = f(x)$ для простой линии легко рассчитать как в случае доплеровского, так и фойгтовского контуров. Нетрудно доказать, что функция $A = f(x)$ в случае полностью разрешенных компонент определяется следующим выражением:

$$A = -\lg \left[\sum_{i=1}^n b_i \cdot 10^{-A_i(b_i x)} \right], \quad (6)$$

где b_i — относительная интенсивность компонент СТС линии; n — число компонент; A_i — величина поглощения, определенная для значения $(b_i x)$ по кривой $A = f(x)$ для простой линии. Формула (6) справедлива при любой форме контура линии.

Сведения о величинах b_i для исследуемых линий SnI приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Относительная интенсивность (b_i) компонент СТС линий SnI

λ SnI, нм	Переход	b_i
286.3	$5^3P_0 - 6^3P_1^0$	0.835 0.11 0.055
270.6	$5^3P_1 - 6^3P_2^0$	0.8385 0.0538 0.0215 0.0862
284.0	$5^3P_2 - 6^3P_3^0$	0.8385 0.0303 0.0303 0.0303 0.0706
224.6	$5^3P_0 - 5^3D_1^0$	0.835 0.11 0.055

Выполненный расчет СТС линии SnI 286.3 нм показал, что она состоит из трех компонент, расположенных, согласно [4], на расстояниях 0.08 и 0.161 см⁻¹ друг от друга.

СТС линий SnI 284.0 и 270.6 нм частично обусловлена расщеплением нижних уровней соответственно 5^3P_2 и 5^3P_1 с известной величиной a [4]. Как показали расчеты, для SnI 284.0 нм этого достаточно, чтобы считать, что данная линия имеет полностью разделенные компоненты СТС при величинах $A < 0.3$ (рис. 1, а). Для линии SnI 270.6 нм учет СТ расщепления уровня 5^3P_1 , как видно из рис. 1, б, только несколько сужает область возможного расположения искомой кривой $A = f(x)$. Численные

эксперименты показали, что зависимость $A=f(x)$ для линии SnI 270.6 нм совпадает с кривой, рассчитанной при полностью разделенных компонентах, если $a(6^3P_0^0) > 0.1 \text{ см}^{-1}$.

Для линии SnI 224.6 нм возможная СТС обусловлена расщеплением верхнего уровня $5^3D_1^0$, так как нижний 5^3P_0 не расщеплен [4]. На рис. 2 представлены результаты численных расчетов $A=f(x)$ для λ 224.6 нм при

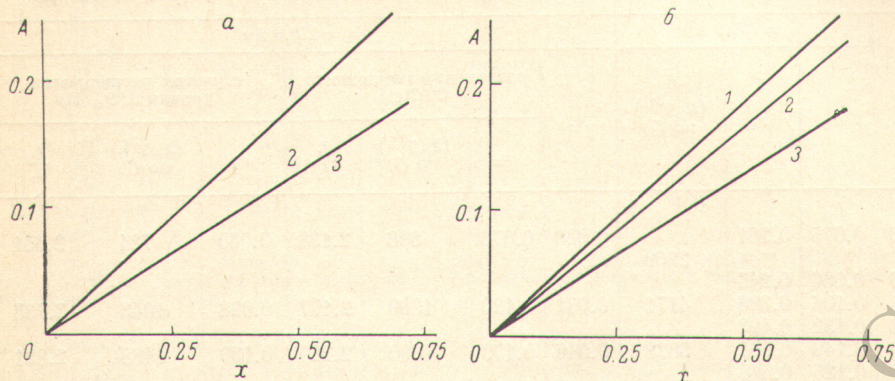


Рис. 1. Зависимость $A=f(x)$ при $T=1300 \text{ К}$ и $T_E=445 \text{ К}$ для линий SnI.

a — $\lambda=284.0 \text{ нм}$, b — $\lambda=270.6 \text{ нм}$; 1 — простая линия, 2 — с учетом СТ расщепления нижнего уровня, 3 — полностью разрешенные компоненты СТС.

разных величинах $a(5^3D_1^0)$. Анализ этих данных показывает, что при $a(5^3D_1^0) > 0.3 \text{ см}^{-1}$ для значений $A < 0.6$ линию SnI 224.6 нм можно считать состоящей из полностью разделенных компонент СТС.

Все расчеты функций $A=f(x)$ проведены на ЭВМ для случая доплеровского контура линий излучения и поглощения, так как при $A < 1$, как показано в работе [3], такое предположение допустимо.

Эксперименты выполнены с металлическим оловом марки «чда», небольшое количество которого помещалось в отросток оптической кварцевой кюветы с $l=3.7 \text{ см}$. Предварительно тренированная кювета отпаивалась под вакуумом порядка $1 \cdot 10^{-5}$ тор. Источником линейчатого спектра служила

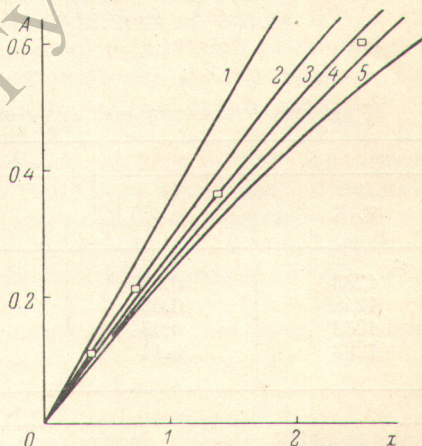


Рис. 2. Зависимость $A=f(x)$ для SnI 224.6 нм при разных величинах $a(5^3D_1^0)$.

1 — 0 (простая линия), 2 — 0.10, 3 — 0.15, 4 — 0.20, 5 — 0.30 см^{-1} (полностью разрешенные компоненты СТС); $T=1200 \text{ К}$, $T_E=480 \text{ К}$.

лампа ВСБ-2 с оловом. Остальная аппаратура была та же, что и в работе [3].

Величины абсорбции (A_i) линий SnI 286.3, 270.6, 284.0 и 224.6 нм измерены в интервале температур $900-1020^\circ \text{ С}$. Эти данные использованы для определения значений x_i по кривым $A=f(x)$. Для линий SnI 286.3 и 284.0 нм, как это следует из вышеприведенного анализа их СТС, такая операция выполняется однозначно. Для линий SnI 270.6 и 224.6 нм находились граничные значения x_i по измеренным величинам A_i . Найденные значения x_i уточнялись с использованием температурной зависимости вида [3]

$$\lg(k_{0i}T^{3/2}) = c - bT^{-1}. \quad (7)$$

Далее по формуле (3) рассчитывались значения относительных сил осцилляторов линий SnI 286.3 и 284.0 нм, а по формулам (1) и (5) оцени-

валились границы интервалов, внутри которых находятся истинные значения f_1/f_2 и f_1/f_4 . Экспериментальные данные вместе с наиболее важными промежуточными величинами, полученными значениями относительных сил осцилляторов исследованных линий SnI или пределами областей,

Т а б л и ц а 2

К расчету относительной силы осцилляторов линий SnI 286.3 и 270.6 нм

Т, К	$\lambda_1 = 286.3$ нм			$\lambda_2 = 270.6$ нм						
	A_1	x_1	$(k_{01}T^{3/2})$ по (7)	A_2	раздельные компоненты СТС (I)			с учетом расщепления уровня 5^3P_1 (II)		
					x_2	$(k_{02}T^{3/2})$ по (7)	$\frac{f_1}{f_2}$	x_2	$(k_{02}T^{3/2})$ по (7)	$\frac{f_1}{f_2}$
1173	0.075	0.281	2959	0.020	0.076	898	2.138	0.060	724	2.651
1173	0.066	0.246		0.031	0.120	1309	2.177	0.098	1043	2.733
1188	0.106	0.398	4171	0.046	0.179	1890	2.220	0.139	1488	2.821
1203	0.132	0.493	5828	0.071	0.276	2705	2.266	0.215	2104	2.913
1203	0.149	0.561	8075	0.076	0.297	3838	2.316	0.229	2951	3.011
1203	0.125	0.478		0.080	0.310			0.241		
1218	0.204	0.777	11102	0.112	0.433	5400	2.37	0.335	4106	3.116
1233	0.264	1.003	15147	0.177	0.709	7535	2.43	0.525	5668	3.228
1233	0.236	0.898	20513	0.176	0.704	9369	2.47	0.522	6997	3.307
1248	0.318	1.236	25010	0.278	1.135	14338	2.56	0.835	10560	3.475
1263	0.434	1.750	36837							
1273	0.490	2.000								
1273	0.500	2.048								
1293	0.668	2.837								

$$I. \left(\frac{f_1}{f_2}\right)_{\text{ср.}} = (2.33 \pm 0.11); \quad II. \left(\frac{f_1}{f_2}\right)_{\text{ср.}} = (3.03 \pm 0.21).$$

Т а б л и ц а 3

К расчету относительной силы осцилляторов линий SnI 284.0 и 224.6 нм

$\lambda_3 = 284.0$ нм				
Т, К	A_3	x_3	$(k_{03}T^{3/2})$ по (7)	f_1/f_3
1233	0.037	0.143	1884	1.093
1248	0.066	0.254	2667	1.138
1263	0.084	0.325	3745	1.187
1293	0.14	0.541	7211	1.295

$\lambda_4 = 224.6$ нм							
Т, К	простая линия (I)				раздельные компоненты СТС (II)		
	A_4	x_4	$(k_{04}T^{3/2})$ по (7)	$\frac{f_1}{f_4}$	x_4	$(k_{04}T^{3/2})$ по (7)	$\frac{f_1}{f_4}$
1173	0.114	0.319	3481	0.667	0.459	4922	0.4717
1173	0.112	0.314			0.450		
1203	0.210	0.584	6537	0.6993	0.866	9824	0.4653
1203	0.215	0.598	11903	0.7316	0.886	18962	0.4593
1233	0.364	1.02	21066	0.7638	1.56	35472	0.4536
1263	0.602	1.71			2.99		

$$\left(\frac{f_1}{f_3}\right)_{\text{ср.}} = (1.18 \pm 0.14) \quad \left(\frac{f_1}{f_4}\right)_{\text{ср.}} = \begin{cases} 0.715 \pm 0.066 & (I) \\ 0.463 \pm 0.012 & (II) \end{cases}$$

Т а б л и ц а 4

Относительные значения сил осцилляторов линий SnI по данным разных авторов

Работа	$\lambda_1 = \frac{f_1}{286.3 \text{ нм}}$	$\lambda_2 = \frac{f_2}{270.6 \text{ нм}}$	$\lambda_3 = \frac{f_3}{284.0 \text{ нм}}$	$\lambda_4 = \frac{f_4}{224.6 \text{ нм}}$
[5]	1000	565	770	308
[6]	1000	438	620	—
[7]	1000	580	980	1800
[8]	1000	598	1013	1857
[9]	1000	—	1217	—
[10]	1000	489	765	—
[11]	1000	433	897	—
[12]	1000	294	970	—
[13]	1000	550	900	—
Наши измерения *	1000	430/330	850	2160/1400

* Дробное число указывает интервал значений, внутри которого находится искомая величина $f_{\text{отн}}$. Числитель дроби относится к случаю, когда расчет выполнялся в предположении полностью разрешенных компонент СТС.

внутри которых они расположены, представлены в табл. 2 и 3. Стандартная ошибка среднего значения подсчитывалась для коэффициента надежности 0.95.

Сравнение полученных результатов $f_{\text{отн}}$ с данными других работ [5-13] показано в табл. 4. За основу принято значение f_1 для линии SnI 286.3 нм. Из табл. 4 видно, что для линии SnI 270.6 нм данные по величине $f_2^{\text{отн}}$ разных авторов сравнительно мало отличаются друг от друга. С ними согласуются результаты наших расчетов значения $f_2^{\text{отн}}$, если считать, что уровень $6^3P_2^0$ имеет расщепление, характеризуемое величиной $a > 0.1 \text{ см}^{-1}$. Найденное значение относительной силы осцилляторов для линии SnI 284.0 нм практически совпало с усредненной величиной f_3 , если ее подсчитать по данным работ [5-13]. Сопоставление полученного интервала значений, в пределах которого находится искомая величина $f_4^{\text{отн}}$, с данными работ [7, 8] дает удовлетворительное согласие, если предположить, что компоненты СТС линии SnI 224.6 нм частично перекрываются. Воспользовавшись формулой (5) и положив в ней, согласно данным [7, 8], $f_4/f_1 = 1.8$, можно оценить величину константы a для уровня $5^3D_1^0$. Рассчитанные для этого случая величины x представлены на рис. 2 совместно с измеренными значениями A по линии SnI 224.6 нм в виде экспериментальных точек. Видно, что они охватывают область, ограниченную кривыми $A=f(x)$ для $a=0.1$ и 0.2 см^{-1} . Следовательно, наиболее вероятное значение константы сверхтонкого расщепления уровня $5^3D_1^0$ равно $(0.15 \pm 0.05) \text{ см}^{-1}$.

Найденные нами значения f_2, f_3, f_4 лучше всего согласуются с результатами работы [11].

Литература

- [1] Физико-химические свойства элементов. Справочник под ред. Г. В. Самсонова. «Наукова Думка», Киев, 1965.
- [2] C. E. Moore. An ultraviolet multiplet table, sect 3, 1962.
- [3] В. Г. Мурадов. Опт. и спектр., 43, 1039, 1977.
- [4] H. Landolt, R. Börnstein. Zahlenwerte und Funktionen. Bd. 1, Tl. 5, Berlin, 1952.
- [5] Ч. Корлисс, У. Бозман. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. «Мир», М., 1968.
- [6] G. M. Lawrence, T. K. Link, R. V. King. Astrophys. J., 141, 293, 1965.
- [7] Н. П. Пенкин, И. Ю. Ю. Славенас. Опт. и спектр., 15, 154, 1963.
- [8] Б. В. Львов. Опт. и спектр., 28, 18, 1970; Автореф. докт. дисс., Л., 1972.
- [9] П. П. Остроуменко, А. М. Еременко. Опт. и спектр., 39, 413, 1975.
- [10] П. Ф. Груздев. Опт. и спектр., 25, 3, 1968.
- [11] J. Lotrian, J. Carion, A. Johannin-Gilles. J. Quant. Spectr. Rad. Transfer, 16, 315, 1976.
- [12] T. Wujec, J. Musielok. Astron. and Astrophys., 50, 405, 1976.
- [13] М. З. Хохлов. Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 25, 249, 1961; 29, 131, 1963.

Поступило в Редакцию 23 января 1978 г.