

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. M. Devyatov, T. N. Solov'ev, L. M. Volkova,
Исследование положительного столба разряда
в парах щелочных металлов. Зондовые измерения,
TVT, 1974, Volume 12, Issue 4, 705–709

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt7394>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.170

May 20, 2025, 03:45:01



УДК 537.525.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА РАЗРЯДА В ПАРАХ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ. ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

А. М. Девятков, Т. Н. Соловьев, Л. М. Волкова

Измерены концентрация и температура электронов, напряженность продольного электрического поля в положительном столбе низковольтного дугового разряда в парах Na, K, Rb и Cs. Разряд зажигался в стеклянной трубке диаметром 3 см при давлениях 10^{-4} – 10^{-2} мм рт. ст. и силах разрядного тока 50–800 ма. Методом двойного дифференцирования электронного тока на зонд определена функция распределения электронов по энергиям. По экспериментально найденным значениям концентрации, температуры электронов и напряженности электрического поля рассчитаны удельная электропроводность плазмы и усредненные по максвелловскому распределению транспортные сечения исследованных атомов.

Интерес к изучению плазмы в парах щелочных металлов вызван бурным развитием ряда областей физики и техники, связанных с проблемой прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (МГДГ, ТЭП), созданием ионных источников, движителей и т. д. Характер протекания физических процессов в изучаемой плазме может быть понятен и количественно оценен при условии, если известны такие ее параметры, как концентрация электронов, функция распределения электронов по энергиям, заселенности возбужденных состояний атомов, напряженность электрического поля в плазме, эффективные сечения упругих и неупругих столкновений электрона с атомом. Авторы вели систематические исследования газоразрядной плазмы низкого давления в парах щелочных металлов для определения этих параметров и выяснения механизмов возбуждения, ионизации атомов. Некоторые предварительные результаты опубликованы в [1–5]. Измерения проводились в плазме положительного столба низковольтного дугового разряда. Разряд постоянного тока зажигался в трубке радиусом $R=1,5$ см, имеющей оксидный катод с косвенным накатом, молибденовые цилиндрические зонды по оси и плоские — у стенок. Конструкция экспериментальной трубки и метод определения давления паров в ней описаны в [3].

1. Для нахождения функции распределения электронов по энергиям использовался метод двойного дифференцирования электронного тока на зонд [6] с применением синхронного детектора. Были построены зависимости логарифма электронного тока на зонд и его второй производной от приложенного на зонд потенциала во всех исследованных разрядах. На рисунке показаны такие зависимости в разряде в парах натрия. Как видно из рисунка, логарифм тока и логарифм его второй производной имеют линейную зависимость от приложенного на зонд потенциала. Прямолинейный характер зависимостей свидетельствует о наличии максвелловского распределения электронов по энергиям в исследованных условиях. Измерения проводились до энергий электронов, превышающих потенциалы ионизаций соответствующих атомов.

Работы по измерению функции распределения электронов по энерги-

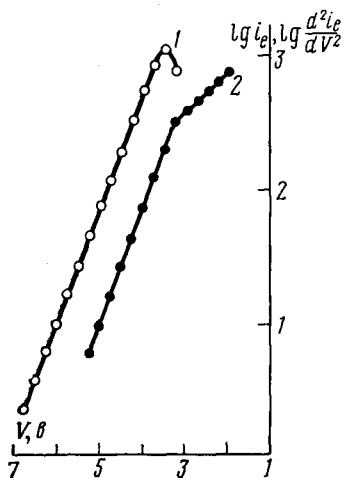
ям в разряде в парах Na, K, Rb авторам не известны. Функция распределения в разряде в парах Cs ранее определялась при давлении $(4 \div 30) 10^{-4}$ мм рт. ст. специальной зондовой камерой [7] и при давлении $(3 \div 30) 10^{-2}$ мм рт. ст. методом двойного дифференцирования электронного тока на зонд [8]. В [7] обнаружено существование двух групп электронов с максвелловскими функциями распределения, в [8] функция распределения измерялась лишь до энергий электронов 2,5 эв и совпадала с максвелловской. Существование быстрой группы электронов в [7], по-видимому, объясняется наличием рассеянных первичных электронов. В условиях этого эксперимента средняя длина свободного пробега электронов (0,3–2 см) была сравнима с расстоянием между катодом и анодом (6 см).

В нашем случае ($\lambda_e \gg R$ и малая степень ионизации) существование максвелловского распределения по энергиям, по-видимому, подтверждает точку зрения, что при таких условиях максвелловское распределение устанавливается не в результате соударений электронов между собой, а благодаря специфическому взаимодействию электронов с пристеночным слоем плазмы [9].

2. Концентрация электронов на оси $N_e(O)$ у стенок трубки $N_e(R)$ и температура электронов T_e определялись из вольт-амперной характеристики одиночного зонда, T_e вычислялось по величине наклона зависимости логарифма второй производной от приложенного на зонд потенциала. Напряженность продольного электрического поля E определялась по разности потенциалов между двумя зондами, расположенными по оси трубки на расстоянии 6 см друг от друга. Разность потенциалов между зондами измерялась методом компенсации тока на зонд.

Зависимости электронного тока на зонд и его второй производной от приложенного на зонд потенциала:

1 — $\lg d^2 i_e / dV^2$; 2 — $\lg i_e$ (разряд в парах натрия, $p = 4,8 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. $i = 200$ ма)



В табл. 1 представлены результаты для исследованных условий в разряде в парах Na, K, Rb, Cs. Зависимости $N_e(O)$, $N_e(R)$, T_e и E от силы разрядного тока и давления имеют вид, характерный для дугового разряда низкого давления: с увеличением силы тока и давления концентрация электронов растет, а электронная температура и напряженность электрического поля уменьшаются.

В табл. 1 представлены результаты для исследованных условий в разряде в парах Na, K, Rb, Cs. Зависимости $N_e(O)$, $N_e(R)$, T_e и E от силы разрядного тока и давления имеют вид, характерный для дугового разряда низкого давления: с увеличением силы тока и давления концентрация электронов растет, а электронная температура и напряженность электрического поля уменьшаются.

Результаты наших зондовых измерений можно сравнить с данными работ [10, 11]. Более поздние работы, посвященные исследованию указанных параметров разряда низкого давления в парах щелочных металлов, нам не известны. В [10] зондовым методом измерены $N_e(O)$, T_e и E в положительном столбе разряда в парах натрия при давлениях $(2 \div 6) 10^{-3}$ мм рт. ст. и силах разрядного тока 0,2 и 1,0 а в трубке радиусом 1,8 см. Аналогичные исследования разряда в парах калия при давлениях $(1 \div 20) 10^{-4}$ мм рт. ст. и силе тока 1а в трубке радиусом 1,6 см проведены в [11].

В табл. 2 представлены сравниваемые величины. Из таблицы видно, что результаты наших измерений в основном согласуются с данными [10, 11]. Мы не можем сравнить наши результаты в разряде в парах рубидия и цезия, так как подобные исследования в парах рубидия нам не известны, а многочисленные работы, посвященные изучению разряда в парах цезия, относятся к давлениям выше 0,01 мм рт. ст.

3. Удельная электропроводность плазмы σ определялась из дифференциального закона Ома

$$\sigma = j/E, \quad (1)$$

где j — плотность силы разрядного тока на оси трубки, найденная с учетом параболического распределения N_e по радиусу. Найденные по формуле (1) значения удельной электропроводности приведены в табл. 1. С ростом силы разрядного тока удельная электропроводность увеличивается.

Таблица 1

Элемент	Элемент								Элемент	Элемент									
	$p \cdot 10^3$, мм рт. ст.	i , ма	$N_e(O) 10^{-10}$, см $^{-3}$	$N_e(R) 10^{-10}$, см $^{-3}$	$T_e \cdot 10^{-3}$, °К	E , в см $^{-1}$	$\sigma \cdot 10^2$, ом $^{-1}$ см $^{-1}$	$Q_d \cdot 10^{14}$, см 2		$p \cdot 10^3$, мм рт. ст.	i , ма	$N_e(O) 10^{-10}$, см $^{-3}$	$N_e(R) 10^{-10}$, см $^{-3}$	$T_e \cdot 10^{-3}$, °К	E , в см $^{-1}$	$\sigma \cdot 10^2$, ом $^{-1}$ см $^{-1}$	$Q_d \cdot 10^{14}$, см 2		
Na	4,8	2	50	0,6	0,3	17,0	0,40	1,8	2,2	Rb	2	0,7	50	0,6	0,3	15,1	0,30	2,4	4,0
			100	1,0	0,5	16,6	0,37	3,8	2,0				100	1,1	0,6	15,1	0,28	5,8	3,5
			200	1,7	0,9	16,0	0,33	8,5	1,6				200	1,9	1,3	14,6	0,24	13,5	2,7
			400	3,0	1,5	14,8	0,32	17,7	1,4				400	2,9	1,5	14,6	0,22	23,3	2,0
			600	5,1	2,3	14,1	0,31	27,3	1,5				600	5,9	2,1	13,1	0,22	42,5	2,8
			800	7,0	3,0	13,8	0,30	37,6	1,7				800	8,0	2,4	12,6	0,21	59,0	2,8
	22	50	0,6	0,2	13,5	0,51	1,4	1,6	Cs	0,7	50	0,6	0,3	12,6	0,37	2,2	2,0		
		100	0,9	0,4	13,0	0,48	2,9	1,4			100	1,0	0,5	12,1	0,34	4,8	1,6		
		200	1,9	0,7	12,0	0,45	6,3	1,4			200	1,9	0,9	11,6	0,31	10,5	1,4		
		400	3,5	1,2	11,0	0,43	13,1	1,3			400	3,3	1,4	9,1	0,29	21,7	1,3		
		600	5,1	2,0	10,5	0,42	20,0	1,2			600	5,1	2,0	8,6	0,28	33,8	1,4		
		800	7,5	2,4	10,1	0,41	27,6	1,3			800	6,9	2,6	8,1	0,26	50,0	1,3		
K	0,62	2,8	50	1,0	0,2	10,0	1,45	0,5	2,2	0,4	1,1	50	0,8	0,3	9,6	0,57	1,4	2,1	
			100	1,7	0,3	9,6	1,40	1,0	2,1			100	1,5	0,5	8,6	0,53	3,1	2,0	
			200	3,7	0,6	8,6	1,23	2,3	1,9			200	2,7	0,8	8,0	0,49	6,6	1,8	
			400	9,2	1,5	8,0	0,96	5,9	1,9			400	5,0	1,4	7,2	0,42	15,6	1,2	
			600	16,0	2,5	7,2	0,78	11,0	1,9			600	7,1	2,3	6,6	0,35	28,0	1,2	
			800	25,0	3,6	7,0	0,67	17,0	1,9			800	13,1	2,8	6,0	0,30	43,3	1,6	
	7,6	100	0,4	0,2	21,6	0,28	6,1	1,3	0,7	100	1,4	0,5	16,1	0,28	8,8	4,8			
		200	1,2	0,5	19,6	0,27	11,2	2,1		200	2,2	0,8	15,5	0,25	13,0	5,0			
		400	2,0	0,7	19,0	0,25	22,6	1,8		400	3,5	1,5	14,6	0,24	27,0	4,1			
		600	2,3	0,8	18,6	0,23	37,0	1,2		600	5,5	2,6	13,4	0,18	54,5	3,3			
		800	3,5	1,0	18,1	0,23	49,0	1,5		800	9,1	3,0	13,0	0,17	76,5	4,1			
		100	1,0	0,4	12,6	0,50	2,8	2,4		1,1	100	1,1	0,5	14,0	0,25	6,5	3,3		
200	1,7	0,9	11,0	0,46	6,1	2,0	200	2,2	0,8		12,6	0,23	14,1	3,2					
400	4,4	1,4	9,0	0,40	14,1	2,3	400	4,8	1,5		11,0	0,22	29,5	3,5					
600	7,8	1,9	8,2	0,34	25,0	2,4	600	8,1	2,8		9,6	0,20	49,0	3,8					
800	10,4	2,6	8,0	0,30	38,0	2,2	800	14,2	3,5		8,8	0,18	72,0	3,1					
100	1,5	0,4	8,5	0,69	2,0	2,2	1,1	100	1,2		0,6	12,0	0,24	6,8	2,4				
200	3,4	1,0	7,6	0,63	4,5	2,3		200	2,2	1,0	10,6	0,23	14,1	2,3					
400	9,6	2,0	6,6	0,50	11,3	2,8		400	4,8	2,0	9,6	0,21	31,0	2,4					
600	16,2	3,0	6,2	0,40	21,2	2,6		600	9,5	3,5	8,5	0,19	51,5	3,0					
800	23,2	4,0	5,8	0,35	32,3	2,4		800	17,0	4,0	7,5	0,17	76,5	3,7					

Удельная электропроводность плазмы, с другой стороны, может быть рассчитана по формуле [12]

$$\sigma = K(T_e) \cdot e^2 N_e / m_e \bar{v}_e \sum_k N_k \langle Q_k \rangle, \quad (2)$$

где e , m_e , N_e — заряд, масса и концентрация электронов; \bar{v}_e — средняя тепловая скорость электронов; $\langle Q_k \rangle$ — усредненное по максвелловскому распределению эффективное сечение столкновения электрона с передачей импульса с частицей сорта k ; $K(T_e)$ — кинетический коэффициент, зависящий в общем случае от степени ионизации, сорта частиц в плазме, вида кривой упругого рассеяния. Различные методы расчета кинетического коэффициента приведены в [12, 13]. Мы взяли для $K(T_e)$ величину 0,82, полученную в [14] в первом приближении последовательного решения кинетического уравнения Больцмана методом Чепмена — Энскога [15].

Так как в нашем случае частота столкновений электронов с атомами намного больше частоты столкновений с ионами, электронами, в формуле (2) вместо суммы $\sum_k N_k \langle Q_k \rangle$ остается величина $N_0 Q_a$, где N_0 — плотность нормальных атомов; Q_a — усредненное по максвелловскому распределению транспортное сечение рассеяния электронов на атомах. Тогда для транспортного сечения получим выражение

$$Q_a = 0,82 \cdot N_e e^2 / m_e \bar{v}_e N_0 \sigma. \quad (3)$$

Вычисленные по формуле (3) значения транспортного сечения атомов представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, они не имеют явной зави-

Таблица 2

Элемент	Na				K		
	Литература	[10]	Данные авторов		[11]	Данные авторов	
$p \cdot 10^3, \text{ мм рт. ст.}$		4,0	4,8		0,58	0,62	
i, a		0,2	1,0	0,2	0,8	1,0	0,8
$N_e(O) \cdot 10^{-10}, \text{ см}^{-3}$		1,25	8,64	1,9	7,5	5,0	3,5
$T_e \cdot 10^{-3}, \text{ }^\circ\text{K}$		22,0	12,6	12,0	10,1	9,0	18,1
$E, \text{ в. см}^{-1}$		0,75	0,56	0,45	0,41	0,25	0,23

Таблица 3

Элемент	$Q_a \cdot 10^{14}, \text{ см}^2$	$V_e, \text{ эВ}$	Литература	Элемент	$Q_a \cdot 10^{14}, \text{ см}^2$	$V_e, \text{ эВ}$	Литература
Na	1,7	0,6—1,5	Данные авторов [10]	Cs	3,4	0,6—1,3	Данные авторов [19]
	1,8	0,8—2,6			3,3	0,33	
	2,1	0,5—1,8	3,0		0,2—0,5		
K	2,8—4,2	0,3—1,1	Данные авторов [16]	3,0	0,15	[21]	
				2,8	0,2	[22]	
	3,0	0,13—0,18	[17]	2,3	—	[23]	
	2,5	0,26—0,8	[18]	8,0	0,05—0,07	[26]	
	0,7	0,43	[24]	0,8—1,6	0,1—0,2	[27]	
	0,7	0,43	[25]	1,0	0,4	[28]	
Rb	2,0	0,5—1,3	Данные авторов				

симости от условий разряда (давление, ток). Усредненные величины транспортного сечения приведены в табл. 3. Там же представлены средние энергии электронов V_e в исследованных плазмах.

Работы, посвященные экспериментальному определению транспортных сечений атомов Na и Rb, нам не известны. Однако для натрия Q_a можно определить по формуле (3), используя данные из работы [10]. Вычисленные таким образом величины транспортного сечения атома натрия имеют разброс от $1,2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ до $3,6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$. Усреднение дает величину $1,8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$, т. е. значение, близкое к нашему. Транспортные сечения атомов калия и цезия определены в работах [16—23]. Большинство из них дают близкие к нашим результатам величины. Исключение составляют работы [24—28], в которых значения Q_a отличаются от наших в два-три раза. По-видимому, эти различия объясняются тем, что в указанных работах величины T_e заметно отличались от значения электронных температур в наших экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *L. M. Volkova, A. M. Devyatov, T. N. Solov'ev, I. A. Kanavets.* VIII Intern. Conf. Phenomena Ionized Gases, Contributed papers, p. 25, Vienna, 1967.
2. *L. M. Volkova, A. M. Devyatov, T. N. Solov'ev.* IX Intern. Conf. Phenomena Ionized Gases, Contributed papers, p. 23, Bucharest, 1969.
3. *Л. М. Волкова, А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев, И. А. Канавец.* Вестн. МГУ, Сер. Физ. и астр., № 1, 67, 1968.
4. *А. М. Девятов, Т. Н. Соловьев.* Ж. прикл. спектроскопии, 13, 29, 354, 1970.
5. *A. M. Devyatov, T. N. Solov'ev, L. M. Volkova.* X Intern. Conf. Phenomena Ionized Gases, Contributed papers, p. 31, 32, Oxford, 1971.
6. *Г. М. Малышев, В. Л. Федоров.* Докл. АН СССР, 92, 269, 1953.
7. *Н. И. Ионов, А. Я. Тонтегоде.* Ж. техн. физ., 34, 354, 1964.
8. *Н. Д. Моргулис, Ю. П. Корчевой, В. И. Лукашенко.* Укр. физ. ж., 12, 1362, 1967.
9. *Ю. А. Бенке, Ю. М. Каган, В. М. Миленкин.* Ж. техн. физ., 33, 1197, 1968.
10. *M. Druyvestein, N. Varmoltz.* Phil. Mag., 17, 1, 1934.
11. *Б. Н. Клярфельд.* J. Phys. USSR, 5, 155, 1941.
12. *А. Ф. Настоящий.* Теплофизика высоких температур, 1, 203, 1963; 3, 191, 1965.
13. *Э. И. Асиновский, В. М. Батенин.* Теплофизика высоких температур, 6, 966, 1968.
14. *H. Schirmer, J. Friedrich.* Z. Phys., 151, 174, 375, 1958.
15. *С. Чепмен, Т. Каулинг.* Математическая теория неоднородных газов. Изд. иностр. лит., 1960.
16. *Б. Н. Клярфельд.* Докл. АН СССР, 25, 658, 1939.
17. *L. P. Harris.* J. Appl. Phys., 35, 1993, 1964.
18. *Д. Я. Дудко, Ю. П. Корчевой, В. И. Лукашенко.* Ж. техн. физ., 41, 1164, 1971.
19. *С. Воескнег, Ф. Мохлер.* NBS Res., 10, 357, 1933.
20. *Ю. М. Волков.* Electricity from MHD, Vienna, 2, 55, 1966.
21. *L. P. Harris.* J. Appl. Phys., 34, 2958, 1963.
22. *Г. А. Касабов.* Теплофизика высоких температур, 4, 729, 1966.
23. *A. Baltog, I. Mustata, L. Nastase, G. Musa.* X Intern. Conf. Phenomena Ionized Gases. Contributed papers, p. 59, Oxford, 1971.
24. *И. Н. Полушкин, Д. Я. Дудко.* Укр. физ. ж., 11, 1269, 1966.
25. *S. Susumi.* Bull. Inst. Space Aeronaut. Sci., Univ. Tokyo, 1, Spec. № 1-5, 1965.
26. *C. L. Chen.* Bull. Amer. Phys. Soc., 7, 398, 1962.
27. *Д. Розлинг.* В сб. Термоэмиссионные преобразователи энергии, 1, 53, М., 1964.
28. *Ю. П. Корчевой.* Автореф. канд. дис., Киев, 1966.