

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В СМЕСИ АРГОН-КИСЛОРОД

В.В. Рыбкин, С.А. Смирнов, А.Н. Иванов

*Ивановский государственный химико-технологический университет, 153460 Иваново, пр.  
Ф.Энгельса, 7, rybkin@isuct.ru*

**Введение.** Низкотемпературная плазма газового разряда в кислороде широко используется для травления резистивных покрытий в микроэлектронике и для модификации поверхности полимерных материалов. Известно, что в такой плазме одним из основных химически активных агентов является атомарный кислород. Можно предполагать, что повышение скорости его образования позволит интенсифицировать процессы с его участием. Одним из возможных путей интенсификации является использование в качестве плазмообразующего газа не чистого кислорода, а его смесей с другими газами. В частности, есть основания полагать, что применение аргон-кислородных смесей позволит реализовать более высокие скорости диссоциации. Действительно, аргон по сравнению с кислородом имеет более высокие пороговые энергии возбуждения электронных состояний, а транспортное сечение имеет в области низких энергий минимум (эффект Рамзауэра). Поэтому при одном и том же значении приведенной напряженности электрического поля  $E/N$  функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в смеси должна быть более "богата" электронами, способными приводить к диссоциации молекул  $O_2$ . Если величина  $E/N$  в смеси не меньше чем в кислороде, а эффект "обогащения" ФРЭЭ будет больше, чем неизбежное уменьшение скорости диссоциации, обусловленное разбавлением смеси, то можно ожидать повышения выхода атомов кислорода. Анализ возможности реализации такой ситуации и посвящена данная работа.

**Экспериментальная часть.** Плазма создавалась путем зажигания разряда постоянного тока в цилиндрическом реакторе ( $R=1.5$  см) из стекла марки С-50. Давление смеси в реакторе менялось в пределах 50-300 Па, диапазон токов разряда составлял 20-110 мА, содержание кислорода варьировалось от 30 до 100 % по объему, линейная скорость потока газа поддерживалась постоянной и соответствовала 30 см/с при н.у. Напряженность продольного электрического поля  $E$  измерялась методом компенсации зондового тока в цепи двух цилиндрических зондов диаметром 20 мкм. Температура газа  $T_g$  отождествлялась с вращательной температурой состояния  $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0)$ , которая находилась по распределению интенсивностей излучения вращательных линий полосы, соответствующей переходу  $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v=0)$ . Излучение плазмы собиралось со всей длины реактора из его узкой осевой зоны и регистрировалось монохроматором МСД (решетка 1200 штр./мм, диапазон длин волн 200-1000 нм, линейная дисперсия  $\sim 10 \text{ \AA}^0/\text{мм}$ , ФЭУ-106). Температура стенки реактора  $T_w$  измерялась калиброванной термопарой медь-константан. Суммарная концентрация частиц  $N$  рассчитывалась по уравнению состояния при известном давлении и  $T_g$ . Из этих же данных находилась и величина  $E/N$ .

С использованием измеренных величин  $E/N$  кинетические характеристики электронов находились путем численного решения уравнения Больцмана для смеси  $O_2$ -Ar в двучленном приближении разложения по сферическим гармоникам. Столкновения электронов с молекулой  $O_2$  описывались 16 сечениями, учитывающими упругие столкновения, возбуждение вращательных, колебательных, электронных состояний и ионизацию. Для атома Ar принимался во внимание 41 неупругий процесс. Сечения были проверены на соответствие получаемых с их помощью кинетических и транспортных характеристик электронов аналогичным характеристикам, измеренным в условиях дрейфующих электронных роев.

**Результаты и их обсуждение.** В таблице приведены основные измеренные экспериментальные данные.

Таблица. Параметры тлеющего разряда в смеси аргона и кислорода

Смесь O <sub>2</sub> – Ar	P, Па	i, mA	T <sub>w</sub> , K	T <sub>g</sub> , K	N, 10 <sup>16</sup> см <sup>-3</sup>	E, В/см	i×E, ВТ/см	E/N, 10 <sup>-16</sup> В·см <sup>2</sup>
0.30 : 0.70	100	20	306	470	1,54	11,83	0,237	7,67
		50	320	520	1,39	10,09	0,504	7,24
		80	335	530	1,37	9,34	0,747	6,83
		110	343	560	1,29	8,65	0,952	6,69
	200	20	313	495	2,93	17,46	0,349	5,96
		50	330	570	2,54	14,71	0,735	5,78
		80	348	630	2,30	13,10	1,048	5,69
		110	360	636	2,28	12,17	1,339	5,34
	300	20	318	475	4,58	21,60	0,432	4,72
		50	339	560	3,88	18,18	0,909	4,68
		80	358	650	3,34	16,15	1,292	4,83
		110	373	690	3,15	14,89	1,638	4,73
0.50 : 0.50	100	20	312	505	1,43	12,93	0,259	9,01
		50	327	520	1,39	10,68	0,534	7,67
		80	342	525	1,38	9,82	0,785	7,11
		110	364	565	1,28	9,18	1,010	7,16
	200	20	318	490	2,96	19,38	0,388	6,55
		50	340	605	2,26	16,03	0,802	7,08
		80	358	678	2,14	14,47	1,157	6,77
		110	371	678	2,14	13,42	1,477	6,28
	300	20	322	502	4,33	25,14	0,503	5,81
		50	348	620	3,51	20,42	1,021	5,82
		80	368	720	3,02	18,15	1,452	6,01
		110	386	758	2,87	16,95	1,864	5,91
0.70 : 0.30	100	20	311	463	1,57	13,26	0,265	8,47
		50	328	545	1,33	11,28	0,564	8,49
		80	340	572	1,27	10,27	0,822	8,11
		110	350	605	1,20	9,63	1,059	8,04
	200	20	316	490	2,96	20,61	0,412	6,97
		50	338	565	2,57	17,14	0,857	6,68
		80	356	672	2,16	15,41	1,233	7,15
		110	372	690	2,10	14,33	1,576	6,82
	300	20	322	525	4,14	26,09	0,522	6,30
		50	347	635	3,42	21,74	1,087	6,35
		80	367	710	3,06	19,35	1,548	6,32
		110	383	755	2,88	18,26	2,009	6,34
1.00 : 0	100	20	315	379	1,91	12,40	0,248	6,49
		50	338	441	1,64	10,70	0,535	6,51
		80	357	490	1,48	9,60	0,768	6,49
		110	374	535	1,35	8,90	0,979	6,57
	200	20	327	411	3,53	19,80	0,396	5,62
		50	361	501	2,89	16,40	0,820	5,67
		80	386	567	2,56	14,10	1,128	5,52
		110	417	651	2,23	13,80	1,518	6,20
	300	20	336	438	4,96	26,10	0,522	5,26
		50	381	554	3,92	21,30	1,065	5,43
		80	420	657	3,31	19,30	1,544	5,83
		110	456	753	2,89	18,20	2,002	6,30

При заданном токе разряда и суммарном давлении изменение состава плазмообразующего газа приводит к экстремальным изменениям величины  $E/N$  (рис. 1, 2). Зависимости качественно одинаковы во всем исследованном диапазоне токов.

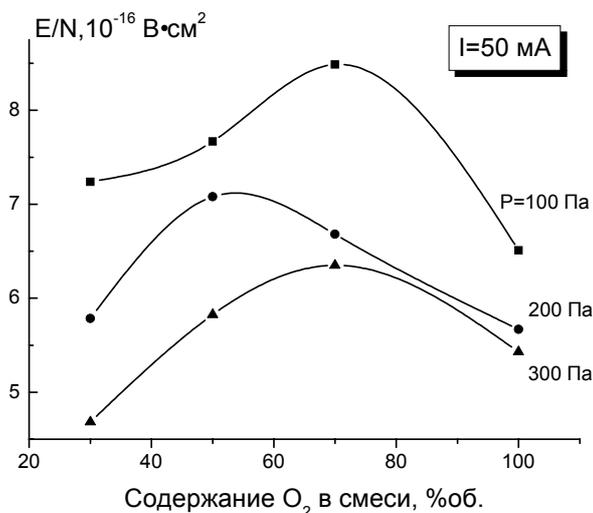


Рис. 1.

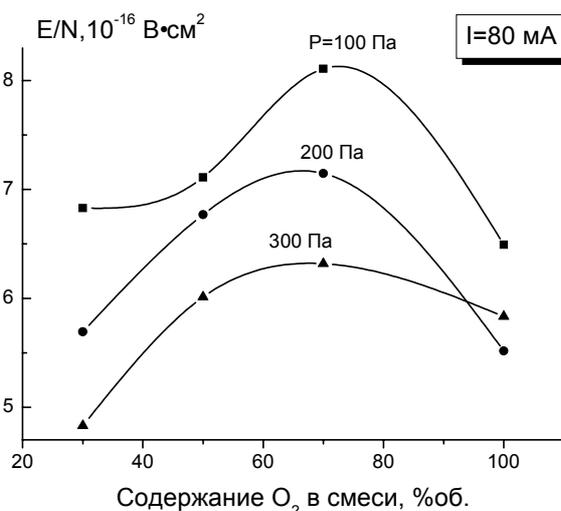


Рис. 2.

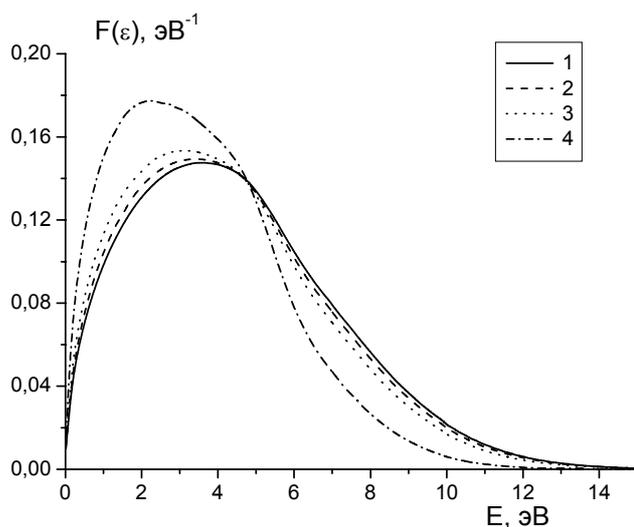


Рис.3. ФРЭЭ.  $P = 200$  Па,  $i = 80$  мА. Содержание кислорода в смеси: 1 – 30 %, 2 – 50 %, 3 – 70 %, 4 – 100 %

Расчеты показывают, что переход от плазмы чистого кислорода к аргону сопровождается ростом высокоэнергетичной части ФРЭЭ (рис. 3). При этом изменяются не только кинетические, но и транспортные характеристики электронов, а следовательно и их концентрация. Поэтому, чтобы анализировать изменения скоростей процессов, мы рассчитывали так называемые приведенные таунсендовские коэффициенты скоростей  $(\alpha/N)$ , которые находились как  $\alpha/N = K_i \cdot Y_i / V_d$ , где  $K_i$  - обычная константа скорости  $i$ -того процесса,  $Y_i$  - мольная доля компонента смеси, а  $V_d$  - скорость дрейфа электронов. В этом случае скорость процесса  $W_i$  определяется как  $W_i = (\alpha/N) \cdot j \cdot N$ , где  $j$  - плотность тока разряда, а  $N$  - полная концентрация нейтральных частиц, то есть скорость процесса прямо пропорциональна приведенному таунсендовскому коэффициенту. В случае параллельных каналов процесса коэффициенты суммировались по каналам.

Изменения параметра  $E/N$  при изменениях состава смеси показывают, что меняются условия баланса образования-гибели заряженных частиц. На рис.4,5 приведены таунсендовские коэффициенты ионизации (сумма по  $O_2$  и Ar) и диссоциативного прилипания электронов к молекуле  $O_2$ . Если бы частоты гибели электронов не менялись при изменениях состава газа, то такие зависимости скоростей ионизации должны приводить либо к росту  $E/N$  при малых давлениях, либо прохождению  $E/N$  через минимум при больших давлениях. Наличие эффективного канала объемной гибели в процессе диссоциативного прилипания должно приводить только к росту  $E/N$  при увеличении содержания  $O_2$ . Поскольку скорость последнего процесса при всех исследованных

параметрах превышает скорость ионизации, то должны иметь место каналы разрушения отрицательных ионов, ведущие к образованию электронов. Таковыми могут быть процессы ассоциативного отрыва с участием атомов  $O(^3P)$  и молекул  $O_2(a^1\Delta_g)$ . По-видимому баланс реакций прилипания-отрыва, контролирующей концентрацию ионов  $O^-$ , приводит к соответствующим изменениям диффузионного времени жизни электронов, которое обусловлено изменениями поля объемного заряда.

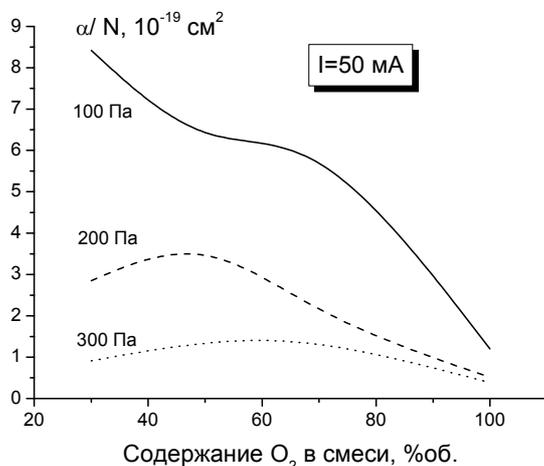


Рис.4. Таунсендовский коэффициент ионизации..

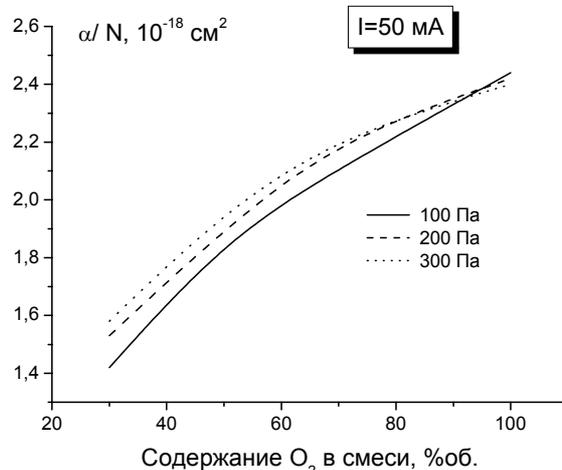


Рис.5. Таунсендовский коэффициент прилипания.

На рис. 6,7 приведены таунсендовские коэффициенты скоростей диссоциации молекул  $O_2$ , которые представляют собой сумму по 3-м каналам:  $O_2 + e \rightarrow 2O(^3P)$ ;  $O(^3P) + O(^1D)$ ;  $O(^3P) + O(^1S)$ .

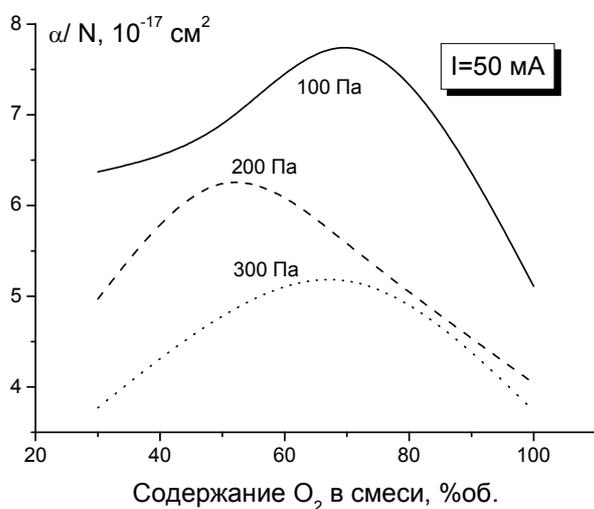


Рис. 6. Таунсендовский коэффициент скорости диссоциации молекул кислорода.

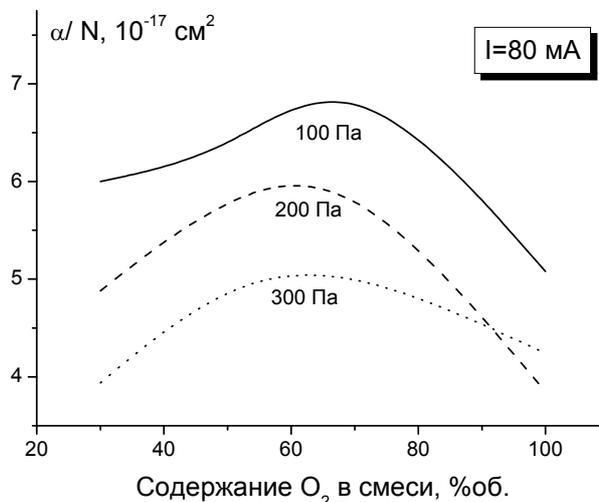


Рис. 7. Таунсендовский коэффициент скорости диссоциации молекул кислорода.

Таким образом, полученные данные показывают, что в аргон - кислородных смесях можно ожидать скоростей образования атомов кислорода на (20-40)% больших, чем в плазме чистого кислорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-17101).