

04;12

Исследование микроскопических характеристик микросекундного импульсно-периодического барьерного разряда

© С.Н. Буранов, В.В. Горохов, В.И. Карелин, П.Б. Репин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: karelin@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 16 декабря 2003 г.)

Приведены результаты исследований электрических, оптических и пространственных характеристик барьерного разряда микросекундного диапазона, формируемого в воздухе атмосферного давления в однородном электрическом поле. Для измерения токовых характеристик отдельных микроканалов использовался метод секционирования электрода. Установлено, что микроразряды первой серии характеризуются относительно низкой (до 280 A/cm^2) плотностью тока. Микроразряды повторных серий имеют ярко выраженную канальную структуру с высокой плотностью тока. На металлическом аноде автографы каналов представляют собой микрократеры диаметром до $4 \mu\text{m}$ глубиной до $0.5 \mu\text{m}$.

Введение

В последние годы импульсно-периодический барьерный разряд (БР) микросекундного диапазона находит все более широкое применение в технике и, в частности, в озонотерапевтической аппаратуре [1–4]. При импульсном питании в газовом промежутке могут быть реализованы объемные (диффузные) режимы горения разряда с высокой эффективностью наработки озона [1]. Однако в отличие от БР, запитываемого синусоидальным напряжением промышленных частот, структура и микроскопические характеристики которого детально изучены, и высокочастотных БР с длительностью полупериода более $100 \mu\text{s}$, результаты исследований которых можно найти в литературе, сведения о параметрах серий микроразрядов и характеристиках микроканалов БР, формируемых кратковременными импульсами напряжения, ограничены [1,5]. Это обстоятельство стимулировало исследования БР микросекундного диапазона, результаты которых представлены в данной работе.

Экспериментальная установка и методика исследований

Исследовались характеристики БР в воздухе атмосферного давления в промежутке с однородной геометрией электрического поля. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для возбуждения разряда использовался генератор высоковольтных импульсов I , разработанный по схеме [6]. Генератор работал в режиме однократных импульсов или с частотой следования импульсов от долей Нз до нескольких кНз. При этом на электродах 2 разрядной камеры формировались квазисинусоидальные импульсы напряжения, состоящие из двух полувольт. Амплитуда первой полувольты достигала 9 kV при скорости роста

напряжения $4 \text{ kV}/\mu\text{s}$, длительность полувольты $5 \mu\text{s}$. Во второй полувольте амплитуда не превышала 2.5 kV .

Разрядный промежуток камеры образован кольцевыми электродами 2 с внешним и внутренним диаметром 48 и 24 mm соответственно. Площадь электродов составляла 13.5 cm^2 . Electrodes изготовлены из нержавеющей стали и устанавливались на изоляторе 3. Между электродами на расстоянии $d = 0.6 \text{ mm}$ от каждого на диэлектрических вставках 4 размещалась пластина 5 толщиной 1 mm . Пластина 5 изготовлена из кварца типа КУ-1 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.4$ (частота 500 kHz , температура 293 K). Ввод и вывод воздуха осуществлялся через отверстия в электродах. Объемная скорость потока равнялась 1 l/min .

Для стабилизации пробоя использовалась предварительная автоионизация промежутка излучением коронного разряда с иницирующих элементов [5]. Элементы иницирования 6 представляют собой дуги, изготовленные из полосок никелевой фольги шириной 2 mm , толщиной 0.1 mm . Полоски располагались над центральными отверстиями электродов и касались поверхности диэлектрика.

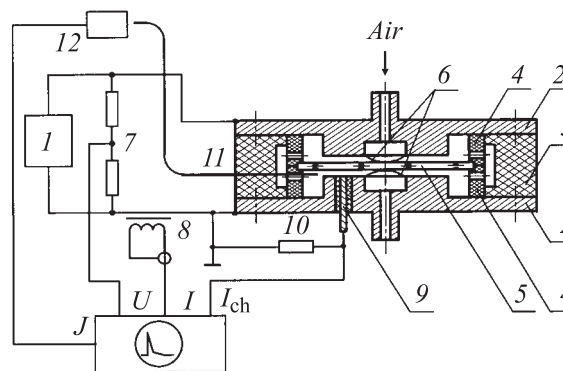


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

В экспериментах регистрировались напряжение U на электродах, интегральный ток I разряда, токи I_{ch} отдельных микроканалов и их отпечатки, а также излучение J разряда в ультрафиолетовой области $0.3-0.36 \mu\text{m}$ и спектр разряда. По осциллограммам токов I и I_{ch} вычислялся заряд Q , переносимый серией микроразрядов, и заряд q , переносимый отдельным микроразрядом.

Измерения временных и амплитудных характеристик сигналов производились с помощью осциллографов HP 54542A и HP 54720D с полосами пропускания 500 и 2 МГц соответственно. Полоса пропускания малоиндуктивного делителя напряжения 7 для измерения U составляла 500 МГц. Интегральный ток I регистрировался поясом Роговского 8 с верхней границей полосы пропускания 200 МГц.

Для измерения токов проводимости I_{ch} отдельных микроразрядов использовалась методика секционирования электродов [7]. Регистрация осуществлялась двумя токоприемными площадками 9 диаметром $D = 1.5 \text{ mm}$, монтируемыми в диаметрально противоположных отверстиях диаметром 2.5 mm в одном из электродов на расстоянии 37 mm друг от друга. На рис. 1 показана одна из них. Чтобы обеспечить одинаковый уровень площадок относительно электрода, рабочая поверхность конструкции после сборки полировалась. Отношение площадей токоприемника и электрода равно 0.0013, что позволяет пренебречь емкостной составляющей регистрируемого тока. Токоприемники подключались к шунтам 10, изготовленным из высокочастотных резисторов сопротивлением 1Ω и размещенным в коаксиальные обратные токопроводы. Полоса пропускания шунтов не хуже 2 GHz.

Структура микроразрядов БР изучалась по эрозионным пятнам, возникающим на измерительных площадках после прохождения импульсов тока I_{ch} . Отпечатки каналов фотографировались микроскопом с увеличением до 400 раз. Масштаб изображения определялся с помощью дифракционных решеток (600 и 1200 штрихов на mm), которые фотографировались с таким же увеличением. Глубина эрозионного пятна оценивалась по длине тени, отбрасываемой стенкой кратера с учетом угла освещения электрода. С целью повышения контрастности отпечатков в некоторых экспериментах на поверхность площадок и электродов наносился тонкий ($< 0.25 \mu\text{m}$) слой сажи. После каждого опыта электрод заново полировался.

Временная привязка к моменту пробоя и принадлежность микроразряда к порядковому номеру серии осуществлялась по осциллограммам напряжения, интегрального тока и излучения. С помощью токоприемных площадок регистрировалась и задержка t_1 между появлением микроразрядов в пределах одной серии.

Излучение разряда выводилось по кварцевому световоду 11 диаметром 0.6 mm. Апертура световода составляла 25° и охватывала центральную область разрядного промежутка (11–12% объема межэлектродного пространства). При этом измерительные площадки

находились вне апертуры. Излучение регистрировалось фотоумножителем 12 типа СНФТ-3. Верхняя граница полосы пропускания детектора 80 МГц. Перед детектором помещались светофильтры и ослабители. Для регистрации спектра разряда использовался спектрограф ИСП-30 с шириной щели $20-40 \mu\text{m}$, устанавливаемый вместо фотоумножителя на выходе световода. Регистрация спектра производилась при частоте 1.6 kHz, время экспозиции 4–6 h.

Результаты экспериментов

Эксперименты показали, что БР возбуждается на фронте или в максимуме импульса напряжения в диапазоне 4.5–9 kV и горит только во время первых полувольтных импульсов. Типичные осциллограммы U , I , J и I_{ch} для одной и нескольких серий микроразрядов представлены на рис. 2 и 3.

Установлено, что основными параметрами, определяющими число серий микроразрядов N , формируемых в течение импульса питания, и их длительность, являются напряжение пробоя первой серии U_{br} и заряд, переносимый первой серией микроразрядов. Так, при $U_{br} > 8 \text{ kV}$ разряд, как правило, представлен только одной серией. Длительность соответствующего ей импульса излучения J составляет на полувысоте $t_J = 5-15 \text{ ns}$. При меньших U_{br} напряжение в течение импульса питания вновь поднимается до пробивного и в промежутке формируются повторные серии. Так, для $U_{br} < 6 \text{ kV}$ $N = 1-5$ при среднем значении $N = 4$. При этом для первой серии $t_J = 5-30 \text{ ns}$, для повторных $t_J = 50-300 \text{ ns}$. При высоких U_{br} токи первых серий обычно превышают токи повторных. Зависимость N от заряда, перенесенного в

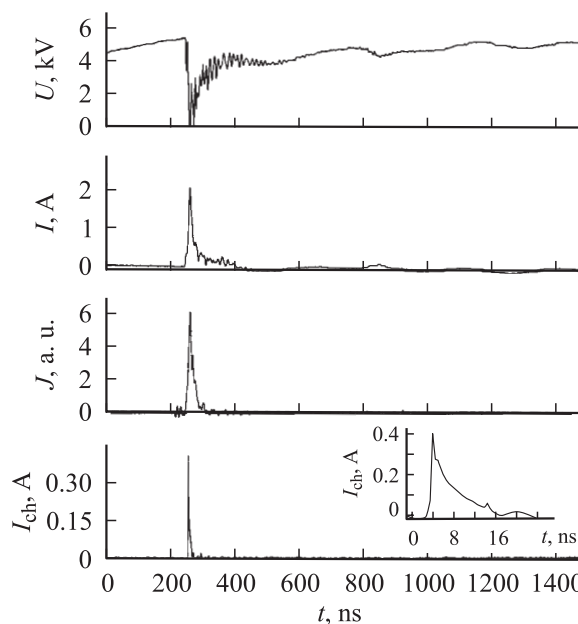


Рис. 2. Осциллограммы сигналов одной серии микроразрядов. На вставке импульс I_{ch} приведен в большем масштабе.

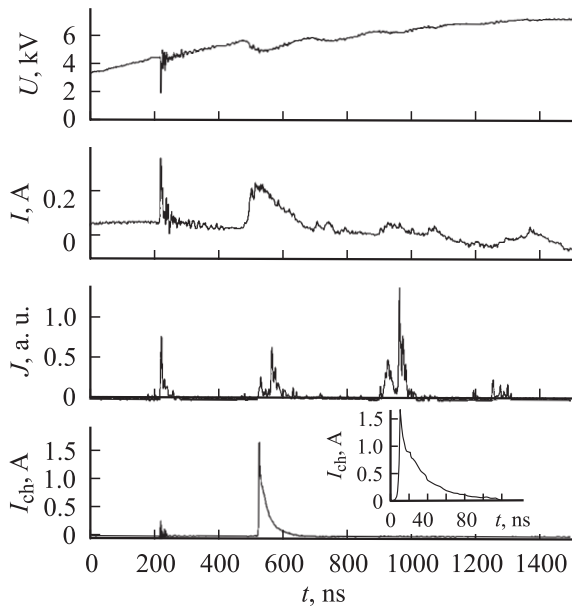


Рис. 3. Осциллограммы сигналов четырех серий микроразрядов.

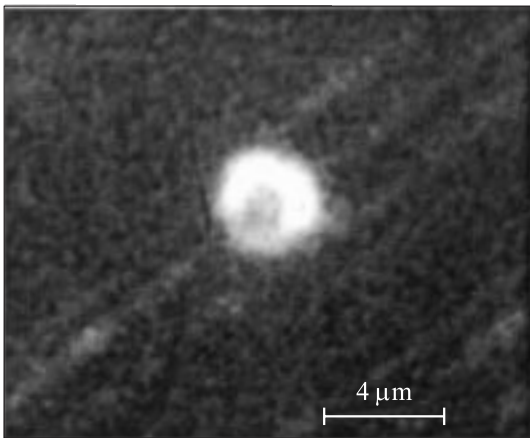


Рис. 4. Эрозионное пятно на измерительной площадке. $D_{ch} \approx 3.5 \mu\text{m}$, $h \approx 0.5 \mu\text{m}$, $I_{ch} = 1.7 \text{ A}$, $\tau_{0.5} = 25 \text{ ns}$, $U_{br} = 5.5 \text{ kV}$.

первой серии, обратная. Даже при относительно невысоких U_{br} при больших Q , разряд может быть представлен единственной серией (рис. 2).

Исследования микроразрядов показали, что амплитуды I_{ch} , их длительности на полувысоте $\tau_{0.5}$ и размеры отпечатков микроканалов лежат в широком диапазоне величин. В случае положительной полярности напряжения на токоизмерительных площадках при $U_{br} > 8 \text{ kV}$ (единственная серия) зарегистрированы токи I_{ch} амплитудой 5 A , длительностью $\tau_{0.5} = 0.5\text{--}2 \text{ ns}$. При этом отпечатков токовых каналов не обнаружено, в том числе и в тех опытах, когда площадки и электроды покрывались сажей.

При $U_{br} = 6\text{--}8 \text{ kV}$ токи микроразрядов достигают $I_{ch} = 2 \text{ A}$ как в первой, так и в повторной сериях, их

длительность составляет в первой серии $\tau_{0.5} = 1\text{--}3 \text{ ns}$ и $\tau_{0.5} = 7\text{--}10 \text{ ns}$ в повторных. Отпечатки обнаружены при $I_{ch} \geq 0.5\text{--}1 \text{ A}$, причем только в опытах с сажевым покрытием площадок и только для микроразрядов повторных серий. Диаметр отпечатков не превышает $1 \mu\text{m}$. В случае нескольких автографов, обнаруженных на площадке, ток I_{ch} промодулирован и число пиков совпадает с числом отпечатков. Интеграл между пиками $2\text{--}5 \text{ ns}$. Для $U_{br} < 6 \text{ kV}$ в микроразрядах первой серии I_{ch} не превышают 0.5 A при длительности $\tau_{0.5} = 3\text{--}7 \text{ ns}$. В повторных сериях токи I_{ch} достигают 1.7 A при $\tau_{0.5} = 8\text{--}25 \text{ ns}$. И в этом случае зарегистрированные отпечатки принадлежат микроразрядам только повторных серий. На напыленных электродах микроразряды распыляют сажу, оголяя поверхность электрода или вжимают ее в электрод и оставляют отпечатки диаметром до $7 \mu\text{m}$. На поверхности ненапыленных площадок и электродов автографы (рис. 4) представляют собой микрократеры диаметром до $D_{ch} = 4 \mu\text{m}$, глубиной до $h = 0.5 \mu\text{m}$, причем внутри кратеров диаметром более $2 \mu\text{m}$ расположен керн.

Эксперименты показали, что смена полярности электрода на характеристики микроразрядов первой серии влияния не оказывает. Вместе с тем обнаружено, что токи микроразрядов повторных серий при отрицательной полярности заметно ниже, чем в случае положительной. Так, максимальное зарегистрированное значение I_{ch} , для первой серии равно $I_{ch} = 5 \text{ A}$, для повторных $I_{ch} = 0.5 \text{ A}$, при этом эрозионные пятна не регистрируются.

Типичные значения заряда $Q = \int I(t)dt$, переносимого первой и последующими сериями микроразрядов, вычисленные для различных U_{br} , представлены в табл. 1. Там же приведены величины заряда $q = \int I_{ch}(t)dt$, переносимого отдельными микроразрядами соответствующих серий.

Измерения t_1 показали, что задержка между двумя микроразрядами первой серии, регистрируемыми измерительными площадками лежит в диапазоне от нуля до максимального значения, определяемого U_{br} . С увеличением U_{br} разброс значений t_1 уменьшается. Так, при $U_{br} < 6 \text{ kV}$ максимальное значение $t_1 = 25 \text{ ns}$, а при $U_{br} > 8 \text{ kV}$ задержка не превышает 10 ns .

В отличие от первой в последующих сериях появление микроразрядов происходит с большим временным разбросом (t_1 до 300 ns). Количество микроразрядов в них изменяется в широких пределах и зависит от переносимого заряда: при $q > 20 \text{ nC}$ серию может представлять всего один микроразряд.

Таблица 1.

$U_{br}, \text{ kV}$	Первая серия		Повторные серии	
	$Q, \text{ nC}$	$q, \text{ nC}$	$Q, \text{ nC}$	$q, \text{ nC}$
8–9	16–40	0.5–10	–	–
6–8	8–20	0.2–5	1–20	0.1–20
5–6	0.4–10	0.05–3	1–50	0.05–45

Таблица 2.

U_{br} , kV	U_d , kV	I_{ch} , A	τ_f , ns	$\tau_{0.5}$, ns	$\tau_{0.1}$, ns	E/p , V/cm · Torr	j_{ch} , A/cm ²	W_{ch} , μJ	P , W/cm ³	q , nC	n , cm ⁻³
9	6.35	5	0.6	1	5.7	70	280	50	$1.7 \cdot 10^7$	10	$6 \cdot 10^{13}$
6.5	4.6	1.2	2	2.5	5	50	67	8	$3 \cdot 10^6$	3	$2 \cdot 10^{13}$

В спектре разряда зарегистрированы яркие полосы второй положительной системы азота: 405.9 nm (полоса 0–3), 380.5 nm (полоса 0–2), 357.7 nm (полоса 0–1), 337.1 nm (полоса 0–0), 315.9 nm (полоса 1–0), а также полоса 391.4 nm первой отрицательной системы азота. Время жизни соответствующих состояний не превышает 1 ns, и излучение должно повторять форму импульса тока. Однако корреляция между импульсами I и J наблюдается только для первой серии микроразрядов; отношение их амплитуд I/J изменяется от импульса к импульсу не более чем на 50%. Это означает, что в первой серии микроразряды распределены в промежутке достаточно однородно. В повторных сериях излучение микроразрядов часто не попадает в апертуру световода, что вызывает несоответствие между отдельными импульсами на осциллограммах I и J (рис. 3).

Обсуждение результатов

В отличие от большинства исследованных БР [1,4] разряд сформирован при $pd < 200$ Torr · cm и, как показали оценки, во всем диапазоне напряженностей поля в газовом промежутке ($E/p < 70$ V/cm · Torr) длина лавинно-стримерного перехода превышает d , что характерно для таунсендовского механизма пробоя. Вместе с тем малые времена запаздывания пробоя ($< 2.5 \mu s$) дают основания полагать, что в отличие от классического таунсендовского разряда, здесь стадия лавинных генераций обеспечивается фотопроцессами [8].

Во всем диапазоне U_{br} в первых сериях микроразряды распределены по поверхности электродов практически равномерно и, по-видимому, диффузны. Оценку снизу плотности тока j_{ch} в этих каналах можно получить, полагая диаметр канала D_{ch} равным диаметру D токоприемной площадки, что дает $j_{ch} = 28\text{--}280$ A/cm². В табл. 2 приведены результаты обчета осциллограмм для максимальных I_{ch} при двух значениях U_{br} и оценки параметров каналов, выполненные в этом же предположении. Здесь U_d — напряжение на газовом промежутке d в момент пробоя, рассчитанное с учетом отношения емкости газового промежутка к емкости диэлектрического барьера; τ_f , $\tau_{0.1}$ — фронт и длительность импульса тока по уровню 0.1. Энерговыделение в канале $W_{ch} = \int I_c U dt$, удельная мощность $P = j_{ch} E$, максимальная плотность электронов $n \approx j_{ch}/ev$, где e и v — заряд и скорость дрейфа электронов.

Как следует из табл. 2, несмотря на существенно большие амплитудные значения I_{ch} и мощности, такие

параметры, как плотность тока, концентрация электронов и энергосодержание каналов в исследуемом БР, близки к параметрам микроразрядов, регистрируемым в БР на промышленных частотах и полученным в теоретических расчетах [9].

Экспериментальные данные позволяют оценить рост температуры ΔT в каналах первой серии как $\Delta T \approx W_{ch}/\rho C_p V_{ch}$, где ρ , C_p — плотность и удельная теплоемкость воздуха, V_{ch} — объем канала в предположении $D_{ch} = D$. Полагая, что вся введенная энергия идет на нагрев, для данных табл. 2 получаем $\Delta T = 6\text{--}35$ K.

Следует отметить значительные заряды, переносимые в первой серии при $U_{br} > 8$ kV (табл. 1). Очевидно, большой перенесенный заряд обуславливает спад напряжения на промежутке, что объясняет зависимость N от напряжения и от Q первой серии.

В отличие от первой в последующих сериях разряд имеет ярко выраженную канальную структуру и по совокупности параметров близок к искровому [8]. Микроразряды повторных серий отличаются большими длительностями, и достигаются большие значения q и W_{ch} (до 100 μJ). Особо отметим наличие эрозионных пятен. Если предположить, что весь ток микроразряда протекает через анодное пятно, то оценка плотности тока для рис. 4 ($D_{ch} \approx 3.5 \mu m$, $I_{ch} = 1.7$ A) дает $j_{ch} \approx 1.7 \cdot 10^7$ A/cm². Очевидно, что это — завышенная оценка и не учитывает тока по периферии пятна. Вместе с тем наличие эрозионных пятен глубиной до 0.5 μm на поверхности металла, температура испарения которого ~ 3300 K, говорит о высоком локальном энерговыделении. Оценки энергии, необходимой для образования микрократера на рис. 4 ($D_{ch} \approx 3.5 \mu m$, $h \approx 0.5 \mu m$), дают $W \sim 1 \mu J$ при энергосодержании канала $W_{ch} \approx 90 \mu J$.

Необходимо отметить следующее. Тонкая структура БР изучалась в основном оптическими методами, и, согласно результатам измерений, минимальные диаметры каналов микроразрядов составляют 0.1–0.3 mm [1,4]. Однако в литературе неоднократно отмечалась сложность измерений „геометрических“ параметров токовых каналов (диаметров стримеров и искр, распределений плотностей токов) оптическими и электронно-оптическими методами [10]. Это обусловлено низкой (не лучше 0.1 mm) интегральной разрешающей способностью аппаратуры, особенно в составе высоковольтных установок. С другой стороны, на фоне светящейся внешней оболочки большого диаметра внутренняя структура канала может быть неразличима. Результаты, полученные в данной работе, дают основания предполагать возмож-

ность формирования аналогичных микроканалов и в частотных типах БР.

Причина различного характера разряда в первой и в последующих сериях не вполне ясна. Возможно, контракция БР обусловлена предысторией: повторные серии формируются в промежутке, однородное поле которого искажено зарядами, перенесенными микрозарядами первой серии.

Выводы

Число серий микрозарядов БР определяется напряжением пробоя и зарядом, переносимым первой серией микрозарядов.

Параметры микрозарядов первой и последующих серий БР различны. Микрозаряды первой характеризуются относительно низкой плотностью тока и температурой и, по-видимому, диффузны. В последующих сериях БР контрагирован. Микрозаряды повторных серий имеют выраженную канальную структуру с высокой плотностью тока, диаметры микроканалов существенно меньше зарегистрированных в БР ранее.

Предположительно формирование канальной структуры обусловлено неравномерным распределением зарядов, перенесенных на диэлектрический барьер первой серией микрозарядов.

Список литературы

- [1] *Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В.* Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ, 1989. 176 с.
- [2] *Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б.* // Тез. докл. II Всероссийской научно-практической конф. „Озон в биологии и медицине“. Н.Новгород, 1995. С. 103.
- [3] *Пантелеев В.И., Косарев А.В.* // Тез. докл. III Всероссийской научно-практической конф. „Озон и методы эфферентной терапии в медицине“. Н.Новгород, 1998. С. 232.
- [4] *Лушин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: МГУ, 1998.
- [5] *Buranov S.N., Gorokhov V.V., Karelin V.I., Repin P.B.* // Digest of Techn. Papers 12 IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Monterey (USA), 1999. Vol. 2. P. 1421–1424.
- [6] *Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б.* // ПТЭ. 1999. № 1. С. 134–136.
- [7] *Verhaart H.F.A., Laan P.C.T.* // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 3. P. 1430–1436.
- [8] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982.
- [9] *Гибалов В.И., Пич Г.* // Журнал физической химии. 1994. Т. 68. № 5. С. 931–938.
- [10] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997.