

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ТОКА И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ДУГИ В АТМОСФЕРЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ДО 1 МГц

Д. Бинягене, Р. Вутейкис, Л. Пранявичус, П. Серапинас

Параметры и механизм образования катодных микропятен вакуумного дугового разряда остаются объектом интенсивного исследования и анализа [1, 2]. Рассматривается вопрос и об аналогии катодных процессов дугового разряда в вакууме и при атмосферном давлении [3]. Однако систематических данных о параметрах катодных микропятен к настоящему времени явно недостаточно. Их измерение ввиду малого размера пятен (0.01—10 мкм), короткого времени жизни (10^{-9} — 10^{-7} с), сложной геометрии разряда, больших электрических токов и долей составляет большие трудности. Поэтому интерес представляет и развитие методов измерения.

В последнее время возрастает интерес к шумовым методам измерения [4—7]. Они применяются и для исследования лазерных разрядов (см., например, [8]). Такие методы позволяют получить довольно тонкую, разностороннюю и сравнительно прямую информацию без возмущения исследуемых объектов и явлений. Так, в [6] из шумовых измерений оценены времена жизни катодных микропятен, показано, что вещество из кратеров в плазму ступает в виде нейтральных частиц. В настоящей работе мы попытались измерить спектры шумов акустического сигнала, электрического тока и излучения плазмы импульсной дуги в атмосфере, рассмотреть их особенности, аналогию и различия с целью развить возможности применения измерений шумов для анализа механизма катодных процессов, состояния плазмы и твердого тела.

Методы измерения

Исследовался импульсный разряд со следующими параметрами: емкость конденсатора 8 мкФ, напряжение 300 В, индуктивность 8 мГн, сопротивление цепи 0.035 Ом. Разряд зажигался в атмосфере между электродами, расположенными на расстоянии 4 и 1 мм. В качестве противоиэлектрода применялся вольфрамовый стержень диаметром 6 мм. Максимальное значение тока 360 А достигалось через 10 мкс. Длительность импульса тока 20 мкс.

Упругие волны, инициированные катодом разряда, регистрировались пьезоэлектрическим преобразователем. Приемник акустического излучения выполнен в виде электроакустического преобразователя с акустическим волноводом. Для того чтобы разделить во времени сигналы электрического индукционного тока и акустического сигнала, регистрируемых в электродах, использовался акустический волновод в виде линзы задержки. Время задержки акустического сигнала 27 нс. Акустический волновод представляет собой кварцевый стержень диаметром 10 мм и длиной 150 мм. На одном конце акустического волновода закреплялся исследуемый металлический образец, который служил катодом или анодом, на другом конце устанавливался пьезоэлектрический преобразователь, которым служила пьезокерамика ЦТС-19. Широкополосность таких датчиков ограничена резонансной частотой, которая в нашем случае равнялась 3 МГц.

Флуктуации тока катода измерялись следующим образом. Тонкий зонд из исследуемого материала сечением около 0.05 мм² устанавливался в отверстие в катоде. Таким образом регистрировался ток с небольшого участка катода. Изменения тока через зонд измерялись при помощи пояса Роговского. Пояс Роговского пропускал без искажения фронт длительностью 5 нс, а сигнал с него пропорционален току, протекающему через зонд.

Флуктуации оптического излучения регистрировались в отдельных спектральных линиях вещества катода. Изображение разряда фокусировалось при помощи кварцевой линзы на входную щель монохроматора ДМР-4. Диафрагмой выделялась прикатодная область разряда высотой 0.5 мм от поверхности катода. Оптическое излучение регистрировалось при помощи фотоумножителя ФЭУ-106.

Измерение токовых шумов оптического излучения и акустических сигналов производилось на измерительно-вычислительном комплексе ИВК-1. Сигнал поступал на фильтр высоких частот с частотой среза 1 МГц, усиливался операционным усилителем (усиление 20 раз на частоте 0.3 МГц). Регистрация реализации производилась 8-разрядным аналого-цифровым

преобразователем с последующей записью на магнитный накопитель. Синхронизация измерительной аппаратуры осуществлялась импульсным генератором Г5-54.

Для получения спектра шумов измерялись 32 реализации сигналов по 128 временных точек с частотой измерения 2 МГц. Для каждой реализации производилось быстрое преобразование Фурье и спектры всех реализаций сглаживались и усреднялись. При этом обеспечивалось частотное разрешение 15.6 кГц и относительная ошибка спектральной плотности не более 20 %. Расчеты производились на ЭВМ СМ-3 измерительно-вычислительного комплекса ИВК-1.

С целью унифицировать условия эксперимента измерения начинались после предварительного обжига (100 импульсов).

Результаты и их обсуждение

Характерные осциллограммы акустического сигнала приведены на рис. 1. Период наиболее низкочастотных колебаний составляет около 50 мкс. В первом полупериоде образец растягивается, во втором — сжатие, амплитуда акустического сигнала больше. Более подробный анализ осциллограмм приводится в спектрах.

Несмотря на значительное общее сходство измеренных акустических спектров, спектры исследованных веществ явно разделяются на два типа. В низкочастотной области спектров, примеры которых приведены на рис. 2, имеется много более или менее ярко выраженных частот, положение которых не зависит от материала и полярности электродов. Это максимумы на частотах 110, 140, 190, 270 и 310 кГц, среди которых наиболее ярко воспроизводятся максимумы на частотах 140 и 270 кГц. Кроме этих максимумов обычно еще наблюдаются максимумы в областях частот 400—550 и 800—1000 кГц (возможно, что иногда положение последнего максимума находится вне области рассматриваемых в настоящей работе частот).



Рис. 1. Акустический сигнал в алюминиевых электродах.

а — анод, б — катод.

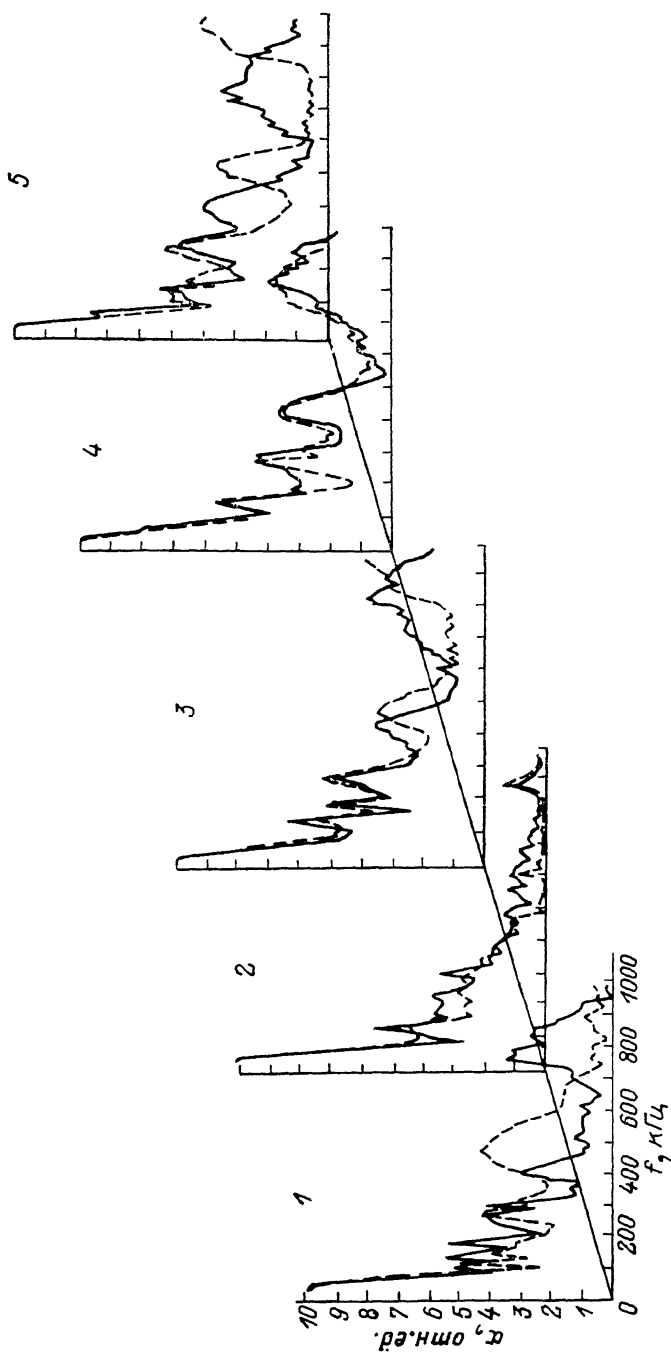
Численные значения этих частот для разных материалов и полярности электродов приведены в таблице. Как следует из таблицы, когда материал является анодом, эти частоты обычно более высоки (из исследованных веществ исключением является только сталь 14X17 H2; для алюминиевого анода без обжига, возможно, высокочастотный максимум находится при частоте более 1 МГц). Вид спектров шумов алюминиевого анода не зависит от расстояния между электродами (в пределах от 1 до 4 мм) как в обычных условиях эксперимента, так и без обжига.

Характерные частоты акустических шумов импульсной дуги в области частот 350—1000 кГц

Материал, условия эксперимента	Частота, кГц			
	катод		анод	
Алюминий	400	810	400	940
Алюминий (без обжига)	470	970	470	—
Олово	440	830	480	960
Сталь 12X18 Н9Т	390	810	540	990
Сталь 14X17 H2	440	830	440	830

В спектре шумов алюминиевого катода без обжига характерные частоты выражены существенно слабее, этот спектр более напоминает акустический спектр меди. В низкочастотной области эти спектры более сходны, наиболее отчетливо воспроизводится максимум на частоте 140 кГц.

Спектры электрического тока и оптического сигнала качественно близки (рис. 3, 4) к спектрам типа рис. 2. Их спектр сравнительно монотонный. Тем не менее некоторые элементы структуры этих спектров аналогичны друг другу и спектрам акустических колебаний. Таким,



например, является максимум в спектрах тока через зонд и интенсивности излучения разряда между алюминиевыми электродами в области частот около 0.5 МГц. Однако в спектрах тока и излучения не наблюдается существенного повышения шума при частоте порядка 0.8—1 МГц (см. рис. 2 и таблицу). Отметим, что обжиг снижает средний шум тока и излучения при частотах 0.5—1 МГц примерно на порядок.

В литературе чаще всего обсуждаются две причины, вызывающие растяжение электродов в начале разряда: поведермоторная сила электрического притяжения и термоупругая волна нагрева [9]. Усиление акустического сигнала в полупериоде сжатия может быть обусловлено потоком испаряющегося из кратеров вещества электронов. Если поведермоторная сила оценивается 10^8 дин/см² [8], то реактивная сила потока (скорость 10^4 м/с, длительность импульса 10^{-7} с) может достигать 1 кбар. Сравнимые с вышеприведенными нагрузками возможны и в термоупругой волне.

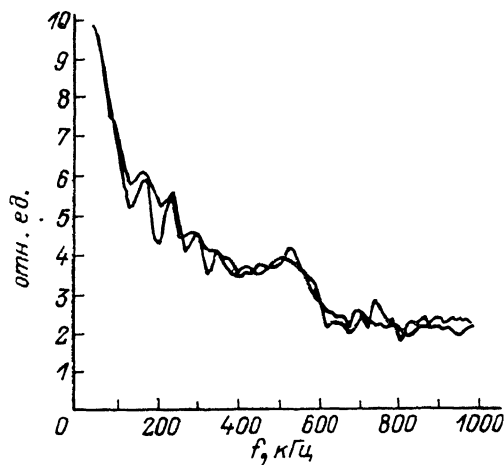


Рис. 3. Спектр тока через зонд в алюминиевом катоде.

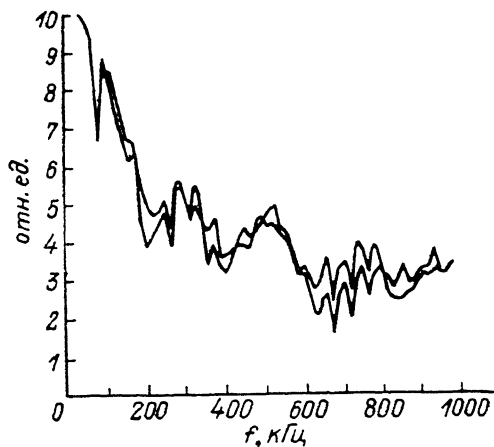


Рис. 4. Спектр флуктуаций интенсивности излучения спектральной линии Al I разряда 394.4 нм.

Среди более высоких частот необходимо отметить как частоты, обратные времени прохождения термоупругого сигнала через образец, систему его крепления и кратные им (0.1—1 МГц), так и частоты, обратные времени жизни катодных пятен второго и первого родов [9] (10^{-2} —10 МГц), и частоты капиллярных волн [10, 11].

Измерение шума излучения позволяет сделать некоторые оценки параметров излучающих структур [12], которые в нашем случае являются катодными пятнами. Так, отношение сигнала к спектральной плотности шума при частоте существенно ниже обратного времени жизни структуры позволяет оценить число таких структурных элементов. В условиях нашего эксперимента в области 1 МГц относительная спектральная плотность шума интенсивности излучения 10^{-8} с (рис. 4), тогда скорость образования кратеров, дающих существенный вклад в излучение, равно 10^8 с⁻¹. Отсюда следует, что за время порядка $2 \cdot 10^{-5}$ с образуется около 10^3 таких кратеров. Следовательно, средний ток через такой кратер около 1 А, что хорошо согласуется как с параметрами пятен вакуумной дуги [3], так и параметрами более сильноточных дуг в атмосфере [6]. Соответственно максимум при частоте около 0.5 МГц, возможно, относится к пятнам второго рода (со временем жизни около 2 мкс), объединяющих около 10 таких, сравнительно крупных, кратеров. Как отмечалось ранее, в спектрах шумов тока и излучения разряда между алюминиевыми электродами отсутствует максимум при частоте порядка 0.8—1 МГц, ярко выраженный в спектре шумов акустического сигнала (см. рис. 2, таблицу). Возможно, он связан с временем разрушения материала в термоупругой волне.

Полученные результаты указывают на перспективность применений спектров шумов к исследованию состояния поверхности вещества, механизма взаимодействия плазмы разрядов с твердым телом и процессов в самом твердом теле. В этом направлении несомненный интерес представляет измерение спектров шумов при частотах более 1 МГц, недоступных в постоянном эксперименте из-за скоростных характеристик использованной аппаратуры, а также исследование корреляционных свойств таких шумов.

- [1] *Hantzsche E.* // Contrib. Plasma Phys. 1987. Vol. 27. N 4. P. 293—308.
- [2] *Зекцер М. П., Раховский В. Н.* // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 1. С. 86—89.
- [3] *Hantzsche E.* // Contrib. Plasma Phys. 1983. Vol. 23. N 1. P. 77.
- [4] *Bingeliene D., Domarkas V., Pranevičius L., Ragauskas A.* // Proc. XI Intern Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Berlin, 1984. P. 89—91.
- [5] *Бингялене Д.-Ю. Й., Рагаускас А. В., Пранявичюс Л. Й.* А. с. 1213506. Б. И. 1986. № 7.
- [6] *Бутейкис Р. Ю., Белазарас А. В., Обераускас И. С., Серапинас П. Д.* // Лит. физ. сб. 1987. Т. 27. № 3. С. 366—368.
- [7] *Пучкарев В. Ф., Проскуровский Д. Н., Мурзакис А. М.* // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2324—2330.
- [8] *Аверьянов И. Е., Балькин Ю. А., Мартюжина Л. И.* и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 11. С. 2142—2146.
- [9] *Раховский В. Н.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. 536 с.
- [10] *Габович М. Д., Порицкий В. Я.* // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. Вып. 1 (7). С. 146—154.
- [11] *Меримевский Л. Л., Титов В. М.* // ДАН СССР. 1986. Т. 286. № 1. С. 109—112.
- [12] *Антанавичюс Р. Л., Серапинас П. Д., Шимжус П. П.* // Опт. и спектр. 1987. Т. 63. Вып. 1. С. 224—225.

Каунасский
политехнический институт
им. Антанаса Снечкуса

Поступило в Редакцию
30 июня 1988 г.
В окончательной редакции
12 декабря 1988 г.

02; 12
©1990 г.

Журнал технической физики, т. 60, в. 2, 1990

МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

А. С. Белов, В. Е. Кузик, В. П. Якушев

Использование метода перезарядной инжекции поляризованных пучков в ускорителях высоких энергий позволяет значительно повысить интенсивность ускоренных поляризованных пучков. Поэтому разработке источников отрицательных поляризованных ионов водорода (H^-) уделяется в последнее время значительное внимание.

В источниках поляризованных протонов, работающих по методу атомарного пучка, двойной перезарядкой поляризованных протонов на натриевой мишени в сильном магнитном поле получены пучки ионов H^- с током 25 мкА [1]. В источниках ионов H^- с ионизацией атомов водорода пучком быстрых атомов цезия получен пучок ионов H^- с током 30—40 мкА [2]. В лазерных источниках поляризованных ионов водорода интенсивность пучка ионов H^- достигает 250 мкА [3]. Одним из перспективных, но до сих пор не реализованных методов получения ионов H^- является метод перезарядки поляризованных атомов водорода на отрицательных ионах дейтерия [4] $\text{H}^0 + \text{D}^- \rightarrow \text{H}^- + \text{D}^0$. Этот процесс имеет большое сечение при низкой энергии относительного движения взаимодействующих частиц ($\sigma \sim 7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ при $\epsilon_{\text{отн}} \sim 10^2 \text{ эВ}$). Предложена и проводится экспериментальная проверка такого метода [2, 5] с использованием поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов дейтерия типа кольцевого магнетрона.

В работе [6] для получения ионов H^- было предложено использовать перезарядку поляризованных атомов водорода на ионах D^- , содержащихся в струе дейтериевой плазмы, которая инжектируется в область перезарядки с магнитным полем около 1 кГс из источника дейтериевой плазмы. Аналогичный метод был использован ранее для получения импульсного пучка поляризованных протонов с пиковым током до 10 мА [6, 7].

В данной работе приводятся результаты экспериментальной проверки метода. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке. Пучки поляризованных атомов водорода и дейтериевой плазмы инжектируются навстречу друг другу и пересекаются в области перезарядки 1 в магнитном поле 1.3 кГс, создаваемом соленоидом 2. Область перезарядки экранировалась от внешних электрических полей экраном 3, на который подавалось импульсное ускоряющее напряжение 10 кВ. Возникающие в результате реакции перезарядки ионы H^-