

УДК 533.951

## ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПОЛЫМ КАТОДОМ

*О. С. Щеглов, Ф. Г. Зверева, Л. Г. Неценко*

Исследовано возбуждение спонтанных низкочастотных колебаний плазмы импульсного типа в разряде с полым катодом при давлении неона 0,1—10 Тор. Изучены условия возникновения этих колебаний и распределение их по сечению полого катода.

Экспериментальные исследования [1—3] указывают на существование в разряде различных мод низкочастотных колебаний, причем их форма имеет сложный характер. Так, в газовом разряде в широком интервале давлений и разрядных токов наблюдается возбуждение низкочастотных колебаний ионного, ионно-звукового и дрейфового типов [4—6]. Характеристики этих колебаний разнообразны и сложным образом зависят от конструкции разрядных трубок и режима разряда. Природа их, по-видимому, различна и связана с поверхностными зарядами, возникающими на стенках трубки, ограничивающей разряд, от массы газа и температуры плазмы [7], существования страт в положительном столбе разряда [8] и т. д. В последние годы все большее внимание уделяется нелинейным процессам в неоднородной плазме. В значительной мере это обусловлено важными приложениями как в лазерной технике, так и СВЧ нагреве плазмы.

Колебания в разряде с полым катодом до настоящего времени изучались мало [9]. В частности, не проводилось систематических исследований характеристик этих колебаний и зависимости их от геометрии разряда, хотя эти исследования имеют определённый научный интерес для изучения развития неустойчивостей и диагностики плазмы.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты исследования низкочастотных колебаний, возникающих в разряде неона с полым катодом.

**Экспериментальная установка и результаты измерений.** Опыты проводились в цилиндрической стеклянной трубке. Катодом служил полый никелевый цилиндр диаметром 30 мм и длиной 150 мм. Анод был в виде диска диаметром 30 мм и мог перемещаться вдоль оси разрядной трубки, межэлектродное расстояние при этом изменялось от 0 до 200 мм.

Для приема колебаний плазмы использовался подвижный цилиндрический зонд. Коллекторная часть зонда имела длину 5 мм и диаметр 0,09 мм. Зонд двигался в катоде по диаметру через прорез в середине его боковой поверхности. Конец зонда был изогнут под прямым углом так, что коллекторная часть была параллельна оси полого катода. Зонд находился под плавающим потенциалом, и сигналы с зонда через разделительную емкость подавались на осциллограф или анализатор спектра. Рабочим газом служил неон. Исследование колебаний проводилось при давлении в интервале 0,1—10 Тор.

Зонд не влиял на низкочастотные колебания импульсного типа. На разрядную трубку одевалась тонкая катушка, располагавшаяся над средней частью полого катода. Воспринимаемые ею колебания подава-

лись на осциллограф. Интенсивность и частота сигнала с этой катушки не изменялись от перемещения зонда в пределах полости катода и даже при выводе зонда за пределы катода. Имеются указания влияния зонда лишь на СВЧ колебания [10].

Для обнаружения условий существования низкочастотных колебаний снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда при различных давлениях и межэлектродных расстояниях. Крутизна ВАХ разряда положительна во всем исследованном диапазоне условий. Гистерезис отсутствовал. Изменение давления и межэлектродного расстояния влияло на величину крутизны ВАХ. Так, при уменьшении расстояния между электродами крутизна ВАХ росла и отсутствовало насыщение, а ток разряда возрастал для одних и тех же напряжений.

С ростом давления до 4 Тор появлялось насыщение. Кроме того, изменение межэлектродного расстояния значительно влияло на потенциал зажигания. Следует отметить тот факт, что при малых межэлектродных расстояниях (20 мм) потенциал зажигания убывал с ростом давления, а при больших (80—100 мм) он увеличивался, но при любом давлении он убывал с уменьшением межэлектродного расстояния.

В указанных пределах давлений в полном цилиндрическом катоде наряду с шумами обнаруживались колебания аperiodического характера (импульсы). Они возникали всякий раз на растущей части ВАХ. Форма импульсов сильно менялась с изменением давления, напряжения на разряде и длины межэлектродного пространства. Импульсы имели большую амплитуду, достигавшую 15 В при напряжении на разряде 280 В. Осциллограмма типичных импульсов приведена на рис. 1 (частота 5,4 кГц и амплитуда 3,4 В). Частота и форма импульсов были стабильными, если все параметры разряда оставались постоянными в течение опыта, и хорошо воспроизводимыми. Импульсы исчезали при перемене полярности электродов.

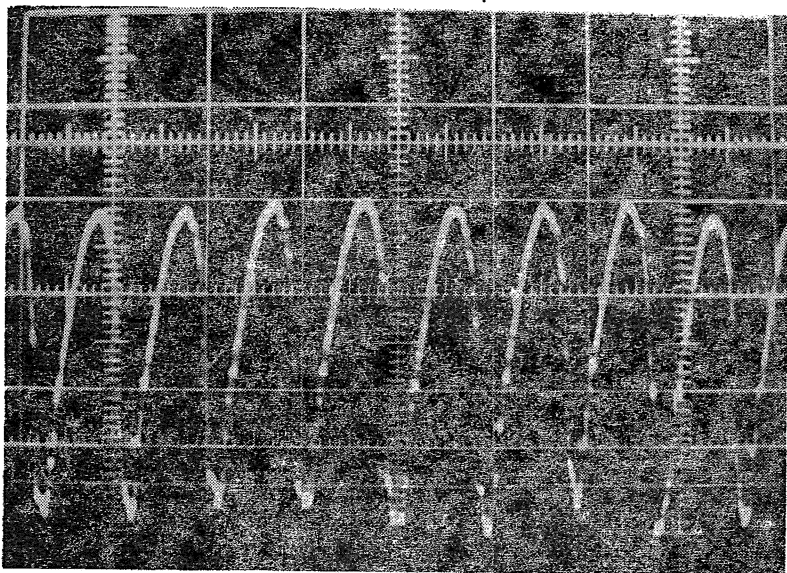


Рис. 1. Осциллограмма импульсов:  $p=0,2$  Тор,  $U_p = 280$  В,  $I_p = 110$  мА,  $l_{ак} = 100$  мм.

Имелись сопутствующие низкочастотные колебания с частотами 20, 25, 30, 40 и 500 кГц и амплитудой порядка 20 мВ и высокочастотные колебания с частотами 15, 17 и 18 МГц и амплитудой 0,8 мВ.

Когда полый электрод был положительным, ток разряда становился слабым (0,88 мА при 380 В), тогда наблюдались низкочастотные колебания с частотой 280 кГц и высокочастотные с частотой 15, 17, 18 МГц с амплитудой 0,2 мВ.

Исследование зависимости амплитуды импульсов от давления при постоянных напряжении и межэлектродном расстоянии показало, что

по мере роста давления амплитуда импульсов возрастала до некоторого максимума, а затем убывала, т. е. для определенных межэлектродных расстояний возбуждение импульсов в полости катода носило резонансный характер. Частота следования импульсов убывала с ростом давления. Наиболее эффективное возбуждение импульсов в центре полости катода наблюдалось при давлении 1,7 Тор, когда  $l_{ак}=80$  мм, и при 4 Тор, когда  $l_{ак}=50$  мм. При  $l_{ак}=20$  мм и меньше резонанс возбуждения импульсов не обнаруживался.

Изменение межэлектродного расстояния влияло на структуру разряда. При удалении анода от катода у поверхности анода наблюдалось появление светящихся полусферических слоев, располагавшихся симметрично у края анода. В катодной полости разряд был ярким. Наибольшая интенсивность свечения была в средней части. Между краем полого катода и анодом свечение разряда было весьма слабым. Катодное падение потенциала составляло 220 В при  $r \cdot p = 8$  мм·Тор.

Амплитуда импульсов зависела от напряжения немонотонно, и она существенно определялась давлением газа. Так, например, при давлении 0,5 Тор амплитуда импульсов заметно увеличивалась с ростом напряжения для различных межэлектродных расстояний. Когда же давление было 4 Тор и выше, амплитуда импульсов почти не изменялась с ростом напряжения, но уровень шума при этом возрастал, особенно при больших межэлектродных расстояниях.

Зависимость амплитуды импульсов от межэлектродного расстояния напоминала резонансную картину, так как при определенном положении анода амплитуда импульсов имела максимум и импульсы становились более четкими. Подобный резонанс зависел от давления.

Например, при малом давлении  $p \sim 0,5$  Тор резонанс не наблюдался; при  $p \sim 1,0$  Тор обнаруживалось увеличение амплитуды импульсов, когда анод располагался на расстоянии 80 мм от катода; при  $p \sim 1,7$  Тор наблюдалось подавление импульсов при расстоянии 50 мм и вновь возрастание амплитуды их до максимума при расстоянии 100 мм. Следует отметить, что с ростом межэлектродного расстояния увеличивался уровень низкочастотного шума.

Таким образом, было установлено существование специфических режимов разряда, при которых в разряде наблюдалось резонансное возбуждение импульсов.

На рис. 2 представлено распределение амплитуды импульсов по радиальному сечению полости катода в условиях резонансного режима. Здесь по оси абсцисс отложено положение зонда (ось полости находилась на метке 16 мм). Приведены результаты опытов, выполненных при давлении 1,7 Тор, напряжении 280 В, разрядном токе 34 мА (в этом случае плотность тока вблизи зонда на оси полого катода была  $3,6$  мА/см<sup>2</sup>) и межэлектродных расстояниях 20, 50 и 100 мм. При этих условиях, когда межэлектродное расстояние было равно 20 мм, распределение являлось картиной стоячих волн, ограниченных стенками

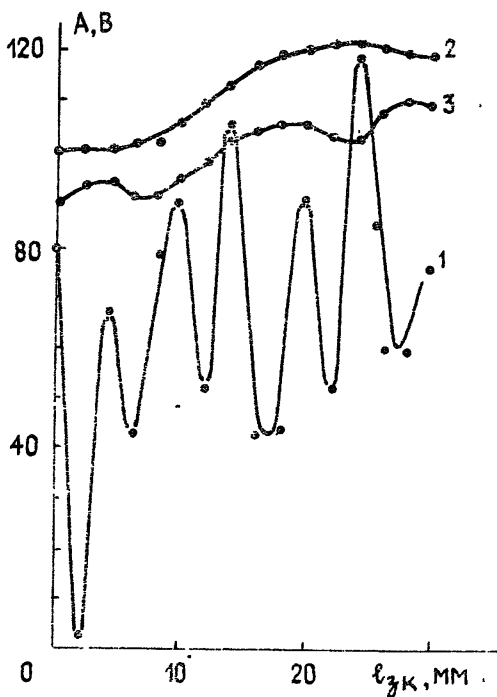


Рис. 2. Радиальное распределение импульсов по диаметру полости катода при различных межэлектродных расстояниях. Кривая 1 — 20 мм, 2 — 50 мм, 3 — 100 мм.

полости (рис. 2, кривая 1). При изменении межэлектродного расстояния картина радиального распределения амплитуды импульсов становилась иной (рис. 2, кривые 2 и 3). Это распределение имело максимум в центральной части и минимум интенсивности ближе к стенкам. Расстояние между максимумами изменялось — с увеличением межэлектродного расстояния уменьшалось число пучностей в картине стоячих волн.

Параметры разряда значительно влияли на характер радиального распределения. Например, небольшое изменение давления или напряжения вело к изменению картины распределения величины интенсивности импульсов и низкочастотного шума. Изменение напряжения значительно меняло картину радиального распределения. Так, с увеличением напряжения от 280 до 380 В в картине стоячих волн уменьшалось число максимумов в распределении и повышался уровень шума. Максимум интенсивности импульсов в средней части сечения полости и рост интенсивности у стенок сменялись минимумами интенсивности. По картине стоячих волн можно было оценить длину волны. Длина волны увеличивалась с ростом напряжения. Например, при 280 В она была равна 1 см, а при 380 В — 2 см.

Радиальное распределение интенсивности импульсов исследовалось также в зависимости от давления. С увеличением давления импульсы становились более пологими, амплитуда их уменьшалась и они имели меньшую скважность, а уровень шума возрастал. Картина стоячих волн при прочих равных условиях становилась менее четкой и длина волны уменьшалась с ростом давления.

Приведенные экспериментальные факты позволяют высказать предположение, что причиной развития таких колебаний являются процессы, протекающие в катодной полости. Порядок частоты наблюдаемых колебаний и характер зависимости амплитуды от условий разряда позволяют предположить, что эти колебания являются следствием развития ионно-звуковых волн в катодной полости и обусловлены взаимодействием колеблющихся в поперечном сечении катодной полости быстрых электронов с плазмой отрицательного свечения. Это возбуждение может иметь резонансную природу, связанную с существованием неоднородного поверхностного слоя плазмы. Тогда амплитуда импульсов достигает столь больших значений, при которых они могут играть существенную роль в формировании разряда. Возможно, что при определенных условиях разряда (давление, напряжение и длина межэлектродного пространства) может осуществляться отражение волн от стенок полости и анода, и тогда будет наблюдаться картина стоячих волн.

Таким образом, основные результаты настоящей работы заключаются в следующем.

Показано, что в полном катоде, наряду с низкочастотными колебаниями и шумом, спонтанно возбуждаются аperiodические колебания—импульсы, имеющие амплитуду на три-четыре порядка большую, чем у низкочастотных колебаний; частота и интенсивность импульсов зависят от давления, напряжения на разряде, но не зависят от внешних параметров цепи разряда; при возникновении и исчезновении импульсов параметры разряда (ток, напряжение и свечение) меняются скачками.

Форма и амплитуда импульсов существенно зависят от давления газа, напряжения на разряде и величины межэлектродного пространства.

Выделяются резонансные условия возбуждения импульсов.

Радиальное распределение интенсивности импульсов в полости катода показывает, что при определенных условиях (давлении, напряжении и межэлектродном расстоянии) возможно отражение волн, дающее картину стоячих волн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Березин А. К., Файнберг Я. Б. и др. — Атомная энергия, 1963, 14, с. 249.
2. Незлин М. Ф. — УФН, 1970, 102, с. 105.
3. Зейдлиц В. П., Безъязычный И. А., Березин А. К. — ЖТФ, 1976, 46, с. 618.
4. Демирханов Р. А., Геворков А. К., Попов А. Ф., Колмаков О. А. — ЖЭТФ, 1972, 63, с. 1653.
5. Демирханов Р. А., Геворков А. К., Попов А. Ф., Колмаков О. А., Астрахарчик Г. Ф. — ЖТФ, 1975, 45, с. 1862.
6. Габович М. Д., Солошенко И. А., Симоненко Л. С., Шкорина Н. В. — ЖЭТФ, 1974, 67, с. 1710.
7. Аланакян Ю. Р., Михалев Л. А. — ЖТФ, 1975, 45, с. 9.
8. Зайцев А. А., Махров В. Ф., Савченко И. А., Швилкин Б. Н. — ЖТФ, 1969, 39, с. 764.
9. Сорокина В. М., Тиманюк В. А., Ткаченко В. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 1, с. 156.
10. Оганезов З. А., Тимошенко Л. С., Цхакая В. К. — ЖТФ, 1981, 51, № 9, с. 1933.

Куйбышевский инженерно-строительный институт

Поступила в редакцию  
16 июля 1985 г.,  
после доработки  
25 февраля 1986 г.

### INVESTIGATION OF LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN THE GLOW DISCHARGE BY THE CYLINDRICAL HOLLOW CATHODE

*O. S. Shcheglov, F. G. Zvereva, L. G. Netsenko*

Excitation of spontaneous impulse low-frequency oscillations in the discharge by the hollow cathode was investigated under the pressure range for 0,1 bis 10 Torr. Conditions of these oscillations occurrence and distribution in the hollow cathode were studied.

---

### ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Всесоюзное агентство по авторским правам (ВААП) сообщает, что в 1987 г. агентство производит выплату авторского гонорара за перепечатку за рубежом статей, опубликованных в журнале «Радиофизика» в 1983 и 1984 гг. Гонорар, поступивший за право перепечатки, выплачивается по желанию авторов в рублях или чеках Внешпосылторга.

Для получения гонорара автору необходимо оформить справку-заявление и направить ее на расчет по адресу:

103670 г. Москва, ул. Б. Бронная, 6-а, Валютное управление ВААП.

Справки-заявления на выплату гонорара по журналу 1983 г. издания принимаются до 1 декабря 1987 г., а по журналу 1984 г. — до 1 июля 1988 г. Выплата гонорара по журналу 1984 г. издания будет производиться начиная с июля 1987 г.

По истечении установленных сроков выплаты гонорара неустраиваемые суммы списываются в доход госбюджета и автор теряет право на получение гонорара.

---