

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЛАЗМЕННОЙ ЗОНЕ ЭЛЕКТРОННО-ИОННОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

*В. М. Рашкован, Ф. М. Трубчанинов*

(Харьков)

Приведены экспериментальные данные о возбуждении электромагнитных колебаний в плазме электронно-ионного колебательного разряда. Рассматривается вопрос о механизме ионизации нейтральной среды пучком колеблющихся электронов и возбуждении при этом электромагнитного излучения. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими выводами для идеализированного случая прохождения электронного пучка через нейтральную среду. Сделано предположение о возможном механизме ускорения быстрых электронов электромагнитной волной.

В ряде работ [1—3] по исследованию электронно-ионного колебательного разряда в магнитном поле было показано, что в системе чередующихся по знаку потенциала электродов при низких давлениях происходит разделение разрядной полости на две взаимосвязанные области колебаний электронов и ионов. Непрерывное пополнение электронного компонента плазмы обеспечивается в основном ионизационными процессами внутри разряда. Ионный компонент непрерывно пополняется за счет ионизации атомов нейтрального газа колеблющимися электронами.

Вопрос о механизме ионизации нейтральной среды пучком электронов теоретически решен в работе [4]. Показано, что наряду с торможением и рассеянием электронов происходит также возмущение среды в некоторой пространственной зоне, которая образуется за счет каскадных процессов ионизации электронами нейтральных атомов. В образовавшейся плазме, окружающей пучок, могут возбуждаться колебания с частотой [4]

$$\omega = \left\{ \frac{4\pi e^2}{M} \left( \frac{3\pi Z^2 e^4 n_0 \sigma^2 N^3 v_0}{4\alpha E_0 \Delta} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

имеющей смысл плазменной частоты  $\omega$  зоны максимальной концентрации при условии, что основной вклад в плотность каскадных электронов вносят электроны с энергией  $E$ , меньшей энергии ионизации  $\Delta$ .

Энергия пучка колеблющихся вдоль магнитного поля электронов, измеренная односторонним направленным и многосеточным зондами, значительно выше энергии поперечного движения каскадных электронов и определяется значениями, близкими к максимуму сечения ионизации нейтрального газа. Для азота она составляет 80—100 эВ.

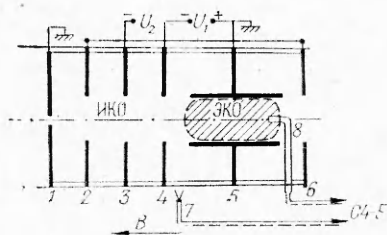
Для рассматриваемых условий эксперимента коэффициент рекомбинации  $\alpha$  принимает малые значения,  $\alpha \approx 10^{-13}$  см<sup>3</sup>/с. Плотность нейтрального газа  $N = 5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, а значение  $n_0 v_0$ , соответствующее току колеблющихся электронов 6 мА, равно  $3,6 \cdot 10^{16}$  с<sup>-1</sup> (здесь  $n_0$  — линейная плотность колеблющихся электронов).

Оценка  $\omega$  для условий разряда, приведенных выше, и значениях  $E_0 = 80$  эВ,  $\Delta = 15$  эВ,  $\sigma = 3 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> (азот) и  $Z = 1$  (так как рассматриваются электронно-электронные столкновения) дает величину  $\approx 2,02 \times 10^{10}$  с<sup>-1</sup> ( $f = 3220$  МГц).

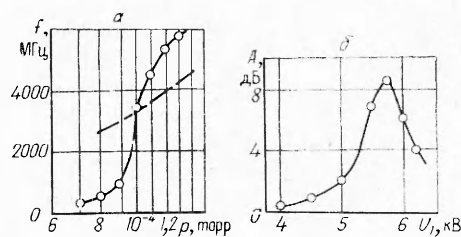
Электромагнитное излучение из плазмы разряда принималось телескопической антенной, установленной вне разряда. Спектральный состав электромагнитного излучения определялся анализатором спектра С4-5.

Антенна ориентировалась и настраивалась на максимальный сигнал, ее положение выбиралось в зависимости от режимов разряда. Кроме того, высокочастотным зондом регистрировались электростатические плазменные колебания. ВЧ-зонд и его калибровка взяты из работы [5]. Зонд устанавливался в плазме электронной колебательной области (в ее центре) или вблизи границы плазмы и мог перемещаться в осевом и радиальном направлениях разряда (фиг. 1, где 1—4, 6 — электроды, 5 — цилиндрический анод, 7 — телескопическая антенна, 8 — высокочастотный зонд, ИКО и ЭКО — ионная и электронная колебательные области).

Значения частот, зафиксированных в эксперименте ВЧ-зондом и антенной при  $U_2=10$  кВ и  $B=600$  Гс, в основном совпадают и составляют 3280—3400 МГц в зависимости от давления и напряжения  $U_1$  на электродах электронной колебательной области.



Ф и г. 1



Ф и г. 2

Экспериментальная зависимость плазменных частот от давления (фиг. 2, а,  $U_1=5$  кВ) близка к приведенной в работе [4] (штриховая кривая), но идет несколько круче. Рост частоты излучения максимальной амплитуды с повышением давления объясняется увеличением актов электронно-электронных столкновений.

Максимум амплитуды электромагнитного излучения возрастает с ростом напряженности электрического поля в объеме электронных колебаний (фиг. 2, б,  $p=1,4 \cdot 10^{-4}$  торр). При напряжении на электродах  $U_1=5,5$ —6 кВ наблюдается амплитудный всплеск колебаний ( $A$  возрастает до 9 дБ), превышающий среднее значение в 4—6 раз. Это находит свое объяснение в перестройке топографии электрического поля ионной и электронной колебательных областей, когда возбуждение колебаний дополняется вторичными электронами ионной области. Эти электроны, устремляясь к аноду, производят дополнительные возмущения нейтральной среды и ее ионизацию.

Стабильное значение частоты электромагнитного излучения наиболее вероятно при энергиях первичного пучка, близких к значениям  $m\Delta$ , в максимуме сечения ионизации (для определенного сорта газа). Максимальные значения амплитуд колебаний также соответствуют указанным условиям.

Влияние магнитного поля (в диапазоне  $B=230$ —600 Гс) незначительно, отмечается линейный рост амплитуды электромагнитных колебаний с ростом индукции внешнего магнитного поля.

Обнаруженное электромагнитное излучение сопровождает процессы ионизации нейтральных атомов и рекомбинацию ионов в электронно-ионном колебательном разряде и является, по-видимому, источником энергии для быстрых электронов в процессе их авторезонансного ускорения в объеме цилиндрического анода (электронная колебательная область) [6].

Авторы выражают благодарность А. С. Долгову за интерес к работе и полезные обсуждения.

Поступила 10 IX 1974

## ЛИТЕРАТУРА

1. Демущий В. П., Хижняк И. А. Функция распределения частиц плазмы в системе чередующихся электродов.— В кн.: Взаимодействие заряженных частиц с плазмой. Киев, «Наукова думка», 1967, с. 178—193.
2. Корсунский М. И., Горбенко Э. М. Определение некоторых параметров электронно-ионного колебательного разряда.— ЖТФ, 1965, т. 35, с. 1193—1202. О некоторых свойствах электронно-ионного колебательного разряда.— ЖТФ, 1965, т. 35, с. 1265—1273.
3. Рашкован В. М., Демущий В. П., Хижняк И. А. Исследование колебательного электронно-ионного разряда в продольном магнитном поле.— ЖТФ, 1969, т. 39, с. 452—457.
4. Долгов А. С. Ионизация нейтральной среды электронным пучком.— ПМТФ, 1973, № 3, с. 24—28.
5. Кархов А. Н. Об использовании В4-зондов при исследовании собственных колебаний плазмы.— В кн.: Диагностика плазмы. М., Атомиздат, 1973, с. 371—375.
6. Воробьев А. А., Диденко А. Н., Ишков А. П., Коломенский А. А., Лебедев А. Н., Юшков Ю. Г. Исследование авторезонансного ускорения частиц электромагнитной волной.— «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 1, с. 3—6.

УДК 537.5

### О ПЕРЕГРЕВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ИМПУЛЬСНОМ КСЕНОНОВОМ РАЗРЯДЕ

*И. И. Литвинов, Е. Д. Люмкис, С. С. Филиппов**(Москва)*

Показано, что полученные ранее условия перегретной неустойчивости существенно изменяются при учете второй ионизации ксенона. Неустойчивость полностью исчезает при постоянстве плотности тяжелых частиц в разряде, а в условиях постоянства рабочего давления возможно скачкообразное изменение температуры во времени в ограниченной области  $T=(15-20) 10^3$  К. Развитие неустойчивости исследовалось численно методом установления. Приводятся установившиеся температурные распределения с сильным контрагированием при переходе локальной температуры через указанный диапазон неустойчивости при постоянном давлении.

В последнее время широко обсуждается возможность скачкообразного изменения температуры в сильноизлучающем импульсном разряде под действием перегретной неустойчивости [1—4], которая возникает, когда относительный прирост излучательной способности плазмы  $\varphi(T)$  становится меньше относительного прироста электропроводности  $\sigma(T)$ . Достоверность теоретического предсказания этого разностного эффекта существенно зависит от правильного учета деталей в расчете  $\sigma$  и  $\varphi$  и поэтому нуждается в экспериментальной проверке. Например, указанная неустойчивость была обнаружена экспериментально в работе [5] при разряде в водяной плазме в области температур  $T=(16-24)10^3$  К и в [6] при разряде в продуктах эрозии кварцевых стенок.

В работе [7], посвященной расчету характеристик электрического разряда в ксеноне при учете только первой ионизации, указывалась нижняя граница неустойчивости в области  $T \geq 16 \cdot 10^3$  К при  $p=10-30$  атм. Однако экспериментально такая неустойчивость в импульсных ксеноновых лампах, в том числе и в мощных режимах [8, 9], не отмечалась. Цель данной работы — более подробный анализ условий возникновения неустойчивости и исследование ее развития в рамках нестационарной и неравновесной модели разряда с учетом второй ионизации, пригодной для расчета за границей устойчивости.