

УДК 533.951 : 537.525

## РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ф. Г. Зверева, О. С. Щеглов, Ю. О. Щеглова

Исследовано радиальное распределение интенсивности спонтанных низкочастотных колебаний и шума в диапазоне частот 10—250 кГц в разряде паров ртути при давлении 0,18—1,2 мТор. Показано соответствие аксиального и радиального распределений интенсивности. Имеется зависимость радиального распределения от параметров разряда. Наблюдались картины типа стоячих волн. Это позволило определить дисперсию волн в радиальном направлении. По измерениям распределений интенсивности и фазы вычислены скорость ионно-звуковых волн ( $1,7 \cdot 10^5$  см/с) и нижняя граничная частота (21 кГц). Граничная частота определялась геометрией разряда. Дано сопоставление с теорией и указано на резонансный характер радиальных мод колебаний, возбуждаемых потоком электронов.

Впервые о радиальном распределении низкочастотных колебаний было сообщено Риваном [1] и Крауфордом [2]. Их опыты проводились в сферических и цилиндрических разрядных трубках, заполненных газами при низких давлениях. Они показали, что наблюдаемые ими резонансные явления были обусловлены отражениями волн от радиальных границ плазмы. Однако было показано [3], что слой положительных ионов, который ограничивает разряд при низком давлении, не может отражать ионно-звуковые волны. В работе [4] предполагается, что течение ионов на стенку может происходить со скоростями, равными (или даже большими) скорости ионно-звуковых волн, вследствие чего и не возникает отраженных волн. Но при наличии вышеуказанных условий имеются также собственные решения [4], которые дают группу резонансных частот. Позднее [5] было исследовано возбуждение низкочастотных колебаний плазмы модулированным пучком отрицательных ионов, скорость которого значительно превосходила скорость ионного звука. Было установлено существование для пучка отрицательных ионов специфического режима, при котором в системе возбуждались ионные колебания и наблюдались стоячие волны вдоль радиуса трубки. Вопрос о радиальном распределении ионно-звуковых волн до сих пор является дискуссионным, и поэтому его изучение нельзя считать окончательно завершенным. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований радиального распределения спонтанных низкочастотных колебаний, возбуждаемых в плазме немодулированным пучком электронов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводились в цилиндрической стеклянной трубке диаметром 8 см. Катодом служила вольфрамовая спираль. Анод изготовлялся в виде диска диаметром 3 см. Колебания исследовались с помощью двух подвижных по радиусу зондов (радиальные зонды) и одного продольного зонда. Радиальные зонды перемещались по линии, отстоящей на

3 см от катода. Зонды изготавливались из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм с длиной неостеклованной части 5 мм. Положение зондов отмерчалось с точностью 1 мм. Сигналы с зондов через разделительные конденсаторы направлялись на два идентичных резонансных фильтра низкой частоты и затем подавались на входы осциллографа. Чтобы измерительные цепи не вносили дополнительного сдвига фаз, фильтры в процессе фазовых измерений не перестраивались. Измерение разности фаз исследуемых колебаний проводилось по анализу фигур Лиссажу.

Давление паров ртути регулировалось температурой отростка с каплей ртути. Исследование проводилось при давлении 0,1 — 1 мТор. Трубка во время опытов находилась под непрерывной откачкой. Питание разряда и накал катода осуществлялись от аккумуляторных батарей.

Обнаружено возбуждение низкочастотных колебаний, частота которых увеличивалась с ростом давления. На рис. 1 представлено распределение интенсивности низкочастотных колебаний (кривые 1, 2) и фазы (кривая 3) по радиальному направлению. По оси абсцисс отложено положение поперечных зондов (ось трубки находилась на метке 4,2 см). Опыты проводились при давлении 0,18 мТор, разрядном токе 550 мА и напряжении 45 В (кривая 1) и при токе 140 мА и напряжении 83 В (кривые 2, 3).

При указанных режимах в разряде наблюдались шум и в нем колебания с частотой 230 и 100 кГц. В первом случае интенсивность низкочастотного шума и колебаний с частотой 230 кГц немного убывала по направлению к аноду, а радиальное распределение интенсивности менялось мало на протяжении всего сечения разряда (рис. 1, кривая 1).

Если изменить параметры разряда (ток 140 мА и напряжение 83 В), то картина радиального распределения интенсивности низкочастотного шума становилась иной (рис. 1, кривая 2). Продольное распределение интенсивности имело резкий рост в катодной области; в средней части разряда наблюдался небольшой минимум, а ближе к аноду интенсивность шума вновь увеличивалась. В этом случае можно было выделить в шуме колебания с частотой 100 кГц только в средней части разряда, тогда как у катода и анода наблюдался только шум. В таких условиях радиальное распределение интенсивности имело максимум в центральной части сечения и минимум интенсивности—ближе к стенкам (рис. 1, кривая 2). У стенок интенсивность шума немного повышалась. Такое радиальное распределение сходно с картиной стоячих волн, что подтверждается фазовыми измерениями на вышеуказанной частоте. Когда в сечении трубки укладывались две полуволны (рис. 1, кривая 2), то фаза колебаний менялась на  $\pi$  при переходе через узел (кривая 3). Когда же стоячие волны не наблюдались (рис. 1, кривая 1), то фаза колебаний менялась плавно и незначительно.

Параметры разряда значительно влияли на характер радиального распределения интенсивности. Небольшие изменения тока разряда [плот-

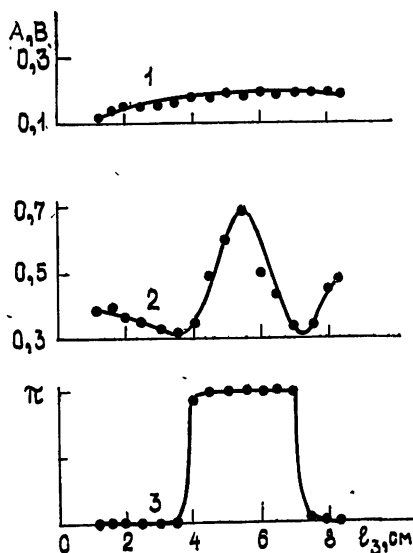


Рис. 1.

ности потока электронов) или напряжения (скорости потока электронов) вели к изменению картины распределения и величины интенсивности низкочастотного шума. На рис. 2 приведено радиальное распределение при давлении  $0,18 \text{ мТор}$ . Кривая 1 снята при разрядном токе, равном  $140 \text{ мА}$ , и напряжении  $83 \text{ В}$ , кривая 2 — при  $140 \text{ мА}$  и  $81 \text{ В}$  и кривая 3 — при  $75 \text{ мА}$  и  $81 \text{ В}$ .

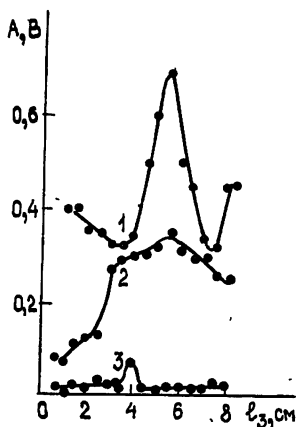


Рис. 2.

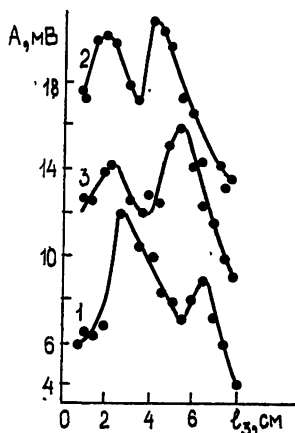


Рис. 3.

Если при токе, равном  $140 \text{ мА}$ , и напряжении  $83 \text{ В}$  наблюдалось радиальное распределение интенсивности низкочастотного шума (при наличии колебаний с частотой порядка  $100 \text{ кГц}$ ) с максимумом в средней части сечения разряда и ростом интенсивности у стенок трубки (рис. 2, кривая 1), то при том же токе, но напряжении  $81 \text{ В}$ , имело место уменьшение интенсивности шума примерно вдвое. Область максимума расширялась и интенсивность спадала к стенкам трубки. В этих условиях в сечении разряда наблюдался только шум. Уменьшение тока разряда до  $75 \text{ мА}$  при постоянном напряжении, равном  $81 \text{ В}$ , приводило к дальнейшему снижению интенсивности шума (рис. 2, кривая 3). В этом случае наблюдался лишь малый максимум интенсивности в средней части трубки, а к стенкам интенсивность, после спада вблизи максимума, почти не менялась. В рассматриваемом случае в разряде наблюдался лишь шум (как и во втором случае) без преобладания какой-либо частоты.

С другой стороны, увеличение разрядного тока при тех же давлении и напряжении вело к ослаблению интенсивности шума, но в этом случае наблюдалось два максимума в радиальном распределении интенсивности. На рис. 3 представлены результаты исследования радиального распределения интенсивности низкочастотного шума при давлении  $0,18 \text{ мТор}$ , напряжении  $80 \text{ В}$  и токах разряда  $180 \text{ мА}$  (рис. 3, кривая 1),  $220 \text{ мА}$  (кривая 2) и  $300 \text{ мА}$  (кривая 3). В исследованном интервале разрядных токов виден рост и спад интенсивности низкочастотного шума. Относительная величина максимумов менялась по мере роста тока. Интенсивность шума у стенок понижалась. Расстояние между максимумами изменялось.

Если сравнить радиальные распределения, снятые при разных токах (рис. 2, кривые 2, 3 и рис. 3, кривые 1, 2, 3), то можно сделать вывод, что интенсивность низкочастотного шума, по мере роста тока от  $75 \text{ мА}$  до  $300 \text{ мА}$ , претерпевает рост до  $0,7 \text{ В}$ , спад до  $0,012 \text{ В}$ , снова

небольшой рост до 0,020 В и спад до 0,015 В (табл. 1).  $I_p$  — ток разряда,  $n_e$  — плотность потока электронов и  $A$  — амплитуда низкочастотного шума.

Таблица 1

$I_p, mA$	75	140	180	220	300	
$n_e \cdot 10^{-7}, cm^{-3}$	3,5	6,5	6,6	8,5	10,4	14,2
$A, B$	0,08	0,7	0,36	0,012	0,020	0,015

Такое поведение уровня низкочастотного шума указывает на существование оптимальных параметров разряда, при которых могут возникать радиальные моды низкочастотных колебаний. Из табл. 1 видно, что в возбуждении спонтанных радиальных низкочастотных колебаний значительна роль плотности потока электронов ( $n_e$ ). Так при плотности потока электронов, равной  $6,5 \cdot 10^7 cm^{-3}$ , максимум интенсивности низкочастотных колебаний достигает 0,7 В, а уже при плотности  $6,6 \cdot 10^7 cm^{-3}$  — только 0,36 В.

В зависимости от параметров разряда, возможно существование таких радиальных распределений интенсивности, когда на геометрической оси разрядного пространства могли наблюдаться как максимумы (рис. 2, кривые 1, 2, 3), так и минимумы интенсивности низкочастотного шума (рис. 3, кривые 2, 3). У стенок трубки интенсивность может уменьшаться (рис. 2, кривая 2; рис. 3) или возрастать (рис. 2, кривая 1).

В дальнейшем исследовалось радиальное распределение интенсивности низкочастотных колебаний, выделяемых фильтрами. Как показал опыт, при давлении 0,18 мТор, разрядном токе 40 мА и напряжении, равном 11,5 В, из шума можно выделить колебания с частотой 92, 152 и 212 кГц, амплитуда которых была несколько больше, чем амплитуда колебаний на других частотах (рис. 4, соответственно кривые 3, 2, 1). Исследование радиального распределения интенсивности этих частот показало, что для колебаний с частотой 212 кГц наблюдался один максимум порядка 10 мВ в средней части трубки и понижение интенсивности к стенкам трубки (рис. 4, кривая 2). Распределение интенсивности колебаний на частоте 152 кГц было несимметричным — с минимумом в средней части и двумя максимумами неравной величины. У стенок виден спад интенсивности (рис. 4, кривая 2). На частоте 92 кГц распределение интенсивности колебаний имеет три максимума и также спад интенсивности к стенкам трубки (рис. 4, кривая 3).

Можно предположить, что наблюдаемое распределение является картиной стоячих волн, ограниченных стенками трубки. Из данных измерений, приведенных на рис. 4, следует, что скорости распространения волн в радиальном направлении росли с увеличением частоты колебаний. Расчет волнового числа  $k$  по результатам фазовых измерений и циклической частоты  $\omega$  дает возможность построить кривую дисперсии (рис. 5, кривая 1). Кривая 2 построена по измерениям при давлении 1,2 мТор, токе разряда 70 мА и напряжении 19 В.

Максимальное значение длины волны ионных колебаний, согласно условиям в работе [6], определяется выражением  $2\sqrt{2\pi r_{ed}}$ , где

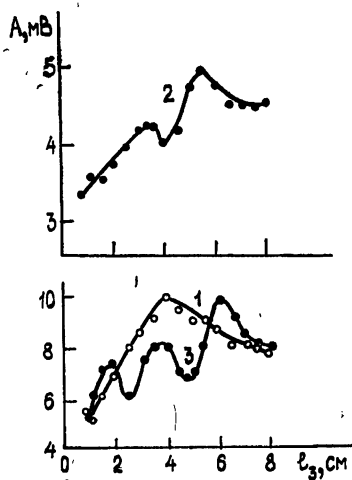


Рис. 4.

Таблица 2

$f, \text{кГц}$	73	119	132	200
$\omega \cdot 10^6, \text{рад/с}$	0,46	0,75	0,83	0,26
$\lambda_{\text{ср}}, \text{см}$	3,5	4,0	4,7	5,7
$k, \text{см}^{-1}$	1,8	1,57	1,34	1,1

$r_{ed}$  — дебаевский радиус. В наших опытах  $T_e = 4 \cdot 10^4 \text{ К}$ ,  $n_e = 9,8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , и тогда  $r_{ed} = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ . Поэтому  $2\sqrt{2}\pi r_{ed} = 8,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ .

В случае  $\lambda = 2\sqrt{2}\pi r_{ed}$  [6] колебания ионов теряют сходство с электронными колебаниями плазмы и становятся ионно-звуковыми. Предельное значение фазовой скорости ионного звука  $v_s = (\gamma k T_e / m_i)^{1/2}$  и имеет величину  $v_s = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , если  $\gamma = 1 \div 1,67$  — показатель адиабаты.

Для радиальных мод частоты возможных колебаний ограничены снизу размерами разряда, а сверху — ионно-плазменной частотой. Верхняя граничная частота ионно-плазменных колебаний может оцениваться по величине  $2\sqrt{2}\pi r_{ed} = 8,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}$  и значению скорости ионного звука  $v_s$ ; получаем  $f_i = f_{\text{max}} = (1,5 \div 1,9) \text{ МГц}$ . Минимальная частота  $f_{\text{min}} = v_s / 2r$ , и при  $v_s = 1,7 \cdot 10^5 \text{ см/с}$  и  $2r = 8,0 \text{ см}$  получаем  $f_{\text{min}} = 21 \text{ кГц}$ . Наблюдаемые на опыте частоты, порядка  $10^5 \text{ кГц}$ , лежат в пределах границ, указанных теорией. Отмечается [4], что для радиальной структуры волн имеется существенное несогласие между теорией и опытом. Так теория резонанса предсказывает резко выраженный минимум на оси и максимум, заканчивающийся на стенке. Опыт дает максимумы в центральной части разряда (рис. 1 и 2) или минимумы в средней части и спад интенсивности к стенкам трубки (рис. 3 и 4).

Возможно, что при одних условиях разряда может осуществляться отражение волн от стенок трубки и будут наблюдаться картины стоячих волн (рис. 2, кривая 1; рис. 3 и 4), а при других — распространение волн от центральной части разряда к стенкам, когда скорости распространения волн будут меньше скорости движения ионов к стенкам (рис. 2, кривые 2 и 3) [4]. Радиальное движение ионов имеет место, так как происходит амбиполярная диффузия. В таком случае источником возбуждения и поддержания колебаний будет дрейф ионов и электронов под действием внешнего электрического поля. Если скорость ионного звука  $v_s \ll \omega$  ( $\omega$  — относительная скорость дрейфа частиц), то в этом случае возбуждение перекрывает диапазоны частот от 0 до  $\omega_{oi}$  [4,7].

Итак, в рассмотренных случаях могут возбуждаться колебания с резонансными модами. Это, по-видимому, соответствует результатам эксперимента. Низкочастотные волны, распространяющиеся радиально, имеют дисперсию (рис. 5). Показано соответствие между радиальным и аксиальным распределениями интенсивности низкочастотных колебаний. С увеличением тока разряда замечено расширение области максимума интенсивности колебаний в средней части разряда и уменьшение уровня интенсивности шума. Небольшое изменение напряжения (на 2,5%) дела-

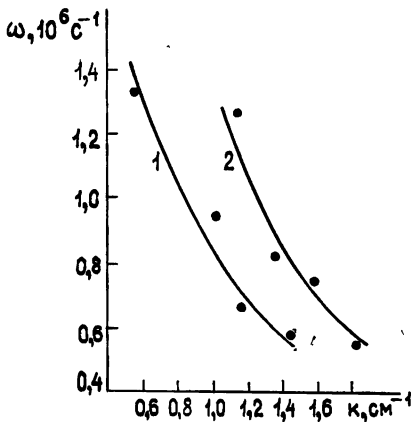


Рис. 5.

ло распределение похожем на картину стоячих волн (рис. 2). Следовательно, в рассматриваемом случае также выделяются резонансные условия возбуждения низкочастотных колебаний при определенных значениях плотности потоков электронов и их скорости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Revans, *Phys. Rev.*, **44**, 798 (1933).
2. F. W. Crawford, *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 663 (1961).
3. W. D. Jones and I. Alexeff, *Proc. Intern. Conf. Ioniz. Phenomena in Gases*, Belgrade, **2**, 330 (1965).
4. R. Rosa and J. E. Allen, *J. Plasma Phys.*, **4**, 195 (1970).
5. М. Д. Габович, Л. С. Симоненко, И. А. Солошенко, Н. В. Шкорина, *ЖЭТФ*, **67**, вып. 5, 1710 (1974).
6. Г. В. Гордеев, *ЖЭТФ*, **27**, 19; 24 (1954).
7. А. И. Ахиезер, И. А. Ахиезер, Р. В. Половин, А. Г. Ситенко, К. Н. Степанов, *Коллективные колебания плазмы*, Атомиздат, М., 1964.

Куйбышевский инженерно-строительный институт

Поступила в редакцию  
29 марта 1976 г.,  
после доработки  
17 февраля 1977 г.

RADIAL DISTRIBUTION OF THE LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN A  
LOW-PRESSURE DISCHARGE

*F. G. Zvereva, O. S. Shcheglov, Yu. O. Shcheglova*

A radial distribution of the intensity of the spontaneous low-frequency oscillations and noise in the frequency of  $10^4$  Hz to  $2 \cdot 10^6$  Hz were investigated in mercury-vapour discharge under the pressure of 0.18—1.2 mTorr. The conformity of the axial and radial distribution of the intensity was shown. There is a discharge-parameters dependence of radial distribution. The standing-wave-type pictures were observed too. It permitted to define a wave dispersion in a radial direction. The velocity of ion-sound waves ( $1.7 \cdot 10^5$  cm/s) and lower-bound frequency (21 kHz) was calculated by measurements of the radial distributions of intensity and phase. The lower-bound frequency was defined by the geometry of discharge as well. A comparison with a theory was given and the resonance character of the radial modes of oscillations excited by the electron stream was pointed out.