

УДК 537.525

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В РАЗРЯДЕ ПРИ МАЛОМ ДАВЛЕНИИ

Ф. Г. Зверева

Исследованы колебания на частотах от 200 до 500 *кГц* в разряде паров ртути при давлении от 0,185 до 1 *мтор*. Показано, что частота этих колебаний не зависит от напряжения и величины разрядного тока, но возрастает с увеличением давления. При увеличении разрядного тока от 20 до 500 *ма* интенсивность колебаний возрастает и имеет два максимума. Интенсивность этих колебаний в разряде увеличивается к аноду в том случае, когда вблизи катода наблюдается острый максимум интенсивности высокочастотных колебаний.

Экспериментально показано [1], что в газовом разряде при малом давлении кроме низкочастотного шума обнаруживались и когерентные колебания. Эти колебания наблюдались при давлении 0,150 *мтор* в широком интервале разрядных токов. Эмелиус [2, 3] считал, что колебания с частотами, меньшими нескольких *МГц*, можно отнести к ионным колебаниям плазмы, так как их свойства согласуются с теорией ионных волн [4]. В более поздних работах [5, 6] такие колебания возбуждались искусственно.

В работе [3] указывается на одновременное существование высокочастотных и низкочастотных колебаний и предполагается, что процесс развития высокочастотных колебаний с большой амплитудой вызывает нелинейные возмущения, и в этих условиях высокочастотные колебания могут поддерживать низкочастотные.

В некоторых работах [7-9] предпринята попытка объяснить связь высокочастотных и низкочастотных колебаний в рамках квазилинейной теории. Эффект нелинейного возбуждения ионных колебаний высокочастотными представляет существенный интерес. Поэтому является целесообразным одновременное исследование низкочастотных и высокочастотных колебаний.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Разряд создавался в цилиндрической стеклянной трубке диаметром 40 *мм*, наполненной парами ртути. Катодом служила спираль из вольфрамовой проволоки. Анод изготовлялся в виде диска диаметром 30 *мм* и мог перемещаться. Межэлектродное пространство менялось от 0 до 160 *мм*. Для приема колебаний использовался цилиндрический зонд обычной конструкции. Давление паров ртути регулировалось температурой отрезка с каплей ртути. Изучение колебаний производилось при давлениях 0,185—1 *мтор*. Во время опытов трубка находилась под непрерывной откачкой. Измерительная аппаратура для исследования высокочастотных колебаний в основных чертах была подобна описанной ранее [10]. Частота и амплитуда низкочастотных колебаний, возбуждавшихся в плазме, определялись с помощью осциллографа типа СИ-1.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью описанной установки были обнаружены высокочастотные и низкочастотные колебания, которые возбуждались в неравновесной слабоионизованной плазме первичным пучком электронов, ускоренных в области катодного падения потенциала.

При малых давлениях (порядка 0,1 *мтор*) характер изменения интенсивности высокочастотных колебаний в разрядном пространстве отличался от распределения интенсивности низкочастотных колебаний. Так, при давлении 0,185 *мтор*, разрядном токе 80 *ма* и напряжении 30 *в* в разряде наблюдались высокочастотные колебания с частотой 825 *Мгц* и низкочастотные колебания с частотой 343 *кГц*.

Интенсивность высокочастотных колебаний достигала наибольшей величины в узкой области разряда вблизи катода (рис. 1 а). Кроме этого узкого максимума в направлении к аноду наблюдались еще небольшие максимумы, величина которых убывала к аноду.

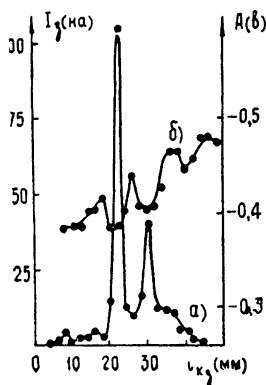


Рис. 1. Распределение интенсивности:
а) высокочастотных и б) низкочастотных колебаний.

Интенсивность низкочастотных колебаний изменялась волнообразно, постепенно увеличиваясь к аноду (рис. 1 б). Вблизи анода она имела наибольшее значение. Минимум низкочастотных колебаний наблюдался там, где был максимум высокочастотных колебаний. Характер колебательных процессов в разряде был различным: на расстояниях до 10 *мм* от катода преобладал электрический шум, который в области максимальной интенсивности высокочастотных колебаний переходил в когерентные низкочастотные колебания. Эти колебания наблюдались далее на расстояниях до 25 *мм* от катода. В этом месте разряда наряду с низкочастотными колебаниями появлялся снова шум. Далее к аноду картина менялась с периодом около 14 *мм*. При этом в областях когерентных низкочастотных колебаний наблюдалась наибольшая интенсивность колебаний, а там, где возник шум, имел место минимум интенсивности. Вблизи анода кроме когерентных низкочастотных колебаний наблюдался шум на частоте порядка 1 *Мгц*.

В опытах было замечено, что рост интенсивности низкочастотных колебаний в направлении к аноду всегда наблюдался вместе с узким максимумом высокочастотных колебаний вблизи катода. Максимальная интенсивность низкочастотных колебаний была одного порядка с интенсивностью высокочастотных колебаний в максимуме (0,5 *в*).

Частота наблюдаемых высокочастотных колебаний отличается от ленгмюровской частоты электронов не более чем на 15%. Низкочастотные колебания, очевидно, являются ионными. Известно, что при отсутствии магнитного поля линейная теория Тонкса и Ленгмюра [4] дает для частот два главных значения: для электронов $\nu_e = (n_e e^2 / \pi m_e)^{1/2}$ и для ионов $\nu_p = (n_p e^2 / \pi m_p)^{1/2}$. Здесь n_e и n_p — электронная и ионная концентрации, m_e и m_p — соответственно массы электронов и ионов. В элементарной теории ν_e является основной частотой когерентных электронных колебаний, ν_p — высокочастотная граница когерентных ионных колебаний.

Для вышеуказанных режимов разряда $\nu_e \sim 10^3$ Мгц, $\nu_p \sim 1$ Мгц. Таким образом, колебания плазмы распадаются на две полосы частот: одну—узкую вблизи ν_e , другую—широкую от ν_p и ниже. Для ионов ртути этот предел ν_p равен 1/600 предела электронных колебаний. В рассматриваемых опытах частота электронных колебаний равнялась 825 Мгц, поэтому предельная частота ионных колебаний должна быть порядка 1,4 Мгц. Эти коротковолновые ионные колебания подобны электронным колебаниям. Большинство выводов, применимых к электронным колебаниям плазмы, справедливо и для коротковолновых ионных колебаний. Известно [4], что если длина волны λ , соответствующая ионным колебаниям плазмы, больше $2\sqrt{2} \pi r_D$, где r_D — радиус Дебая, то колебания ионов теряют сходство с электронными колебаниями плазмы и становятся сходными с электрическими колебаниями звуковой частоты (ионно-звуковыми). Их фазовая скорость может достигать предельного значения $v_\phi = 3,9 \cdot 10^5 (T_e m_e / m_p)^{1/2}$ и в опытах составляла $9 \cdot 10^4$ см.сек⁻¹; соответственно $\lambda = 0,26$ см. Если $\lambda > 0,1$ см, то частота ионно-звуковых волн заключена в интервале от 900 кгц и ниже, но, вероятно, она не переходит за ту границу, которая определяется длиной волны, соизмеримой с размерами разрядной трубки (в данном случае минимальная частота порядка 20 кгц). В нашем опыте величина $2\sqrt{2} \pi r_D = 6,21 \cdot 10^{-2}$ см была меньше λ . Следовательно, наблюдавшиеся в опытах низкочастотные колебания можно считать ионно-звуковыми, возникающими в плазме при прохождении через нее пучка электронов, который одновременно возбуждает и электронные колебания.

Представленная на рис. 1 зависимость позволяет думать, что между высокочастотными и низкочастотными колебаниями существует связь и при некоторых условиях высокочастотные колебания поддерживают низкочастотные. Эти связь может быть обусловлена нелинейными явлениями в плазме, которые наблюдаются при возбуждении сильных высокочастотных колебаний, обнаруживаемых вблизи катода. Для раскачки системы в этих условиях необходима предварительная модуляция первичного электронного пучка, в результате чего могут наблюдаться биения пучка. Модуляция пучка происходит вблизи катода вследствие флуктуаций границ катодных частей разряда. Возможно, что посредством модуляции первичного электронного пучка осуществляется связь между электронными и ионными колебаниями плазмы.

В опытах изучалась зависимость частоты и интенсивности низкочастотных колебаний от разрядного тока, давления и напряжения на трубке. На рис. 2 а представлено изменение интенсивности на частоте 428 кгц при увеличении разрядного тока от 20 до 500 ма, при давлении 0,446 мтор, напряжении на трубке 30 в и расстоянии между электродами 50 мм. Из графика видно, что интенсивность низкочастотных колебаний

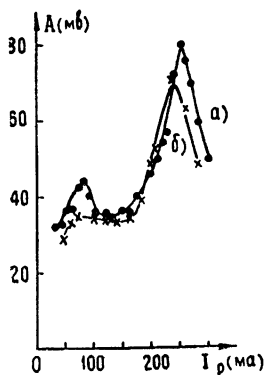


Рис. 2. Зависимость интенсивности низкочастотных колебаний от разрядного тока при расстоянии анод—катод: а) 50 мм, б) 70 мм.

увеличивается с ростом разрядного тока и наблюдается два максимума при токе 80 и 250 ма. При токах, меньших 20 ма, в разряде наблюдался лишь шум. Когерентные низкочастотные колебания появлялись в том

случае, если ток превышал 40 *ма*, и были наиболее четкими при токах от 60 до 200 *ма*. Начиная с разрядного тока в 200 *ма* и выше в разряде на фоне когерентных колебаний обнаруживался низкочастотный шум, интенсивность которого возрастала при дальнейшем увеличении тока. Изменение разрядного тока не влияло на частоту этих колебаний. При увеличении межэлектродного расстояния максимум амплитуды низкочастотных колебаний смещался в сторону меньших токов (рис. 2 а, б), а частота колебаний уменьшалась. Если для расстояния анод—катод 50 *мм* частота равнялась 428 *кГц*, то для расстояния 110 *мм* она уменьшалась до 330 *кГц*.

С возрастанием давления от 0,185 до 1 *мтор* наблюдалось увеличение частоты колебаний В табл. 1 показана эта зависимость для разрядного тока 80 *ма* и напряжения 30 *в*. Расстояние между электродами и положение зонда при этом были неизменными и равнялись соответственно 50 и 24 *мм*. Кроме того, было замечено, что с увеличением давления низкочастотный шум появлялся при меньшей величине разрядного тока.

Таблица 1.

<i>p</i> (<i>мтор</i>)	0,185	0,490	0,588	0,644	0,752	1
<i>f</i> (<i>кГц</i>)	343	400	428	450	468	500

Зависимость колебаний от напряжения исследовалась при давлении 0,490 *мтор*, разрядном токе 80 *ма* и расстоянии между электродами 50 *мм*. Напряжение на трубке изменялось от 15 до 80 *в*. Наблюдалось изменение интенсивности высокочастотных колебаний при увеличении напряжения. Интенсивность имела максимум при определенном напряжении на трубке (40 *в*), а частота возрастала. При этом частота и интенсивность низкочастотных колебаний не изменялись. Следует отметить, что при напряжениях, меньших чем 20 *в*, в плазме наблюдался шум. При напряжениях от 25 до 50 *в* наблюдались периодические колебания на частоте 400 *кГц* и при напряжениях, больших 50 *в*, вновь появлялся шум. Периодические низкочастотные колебания наблюдались в том интервале напряжения, где высокочастотные колебания имели максимальную интенсивность.

Проведенные опыты показали, что частота низкочастотных колебаний не зависит от разрядного тока и напряжения, а увеличивается с ростом давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Labrum, H. Bigg, Proc. Phys. Soc., **65**, 195 (1952).
2. K. Emeleus, Nuovo cimento, **3**, 490 (1956).
3. K. Emeleus, Appl. Scient. Res., **B5**, 66 (1955).
4. L. Tonks, I. Langmuir, Phys. Rev., **33**, 195 (1929).
5. А. А. Зайцев, М. Васильева, Э. Андрюхина, Изв. АН СССР, сер. физ. **23**, 995 (1959).
6. А. А. Зайцев, Б. Н. Швилкин, ДАН СССР, **172**, 565 (1967).
7. Б. Б. Кадомцев, сб. Вопросы теории плазмы, **4**, Атомиздат, М., 1964.
8. А. А. Галеев, В. И. Кирпман, ЖЭТФ, **44**, 592 (1963).
9. Н. С. Репалов, Г. А. Хижняк, ЖТФ, **36**, 224 (1966).
10. Ф. Г. Зверева, Уч. зап. Куйб. пед. ин-та, вып. 49, 198 (1965).

LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN THE DISCHARGE OF LOW PRESSURE

F. G. Zvereva

Oscillations are investigated at the frequency from 200 kc to 500 kc in mercury vapour discharge at the pressure from 0.185 mtorr to 1 mtorr. The frequency of these oscillations is shown not to depend on voltage and value of current but the frequency increases with the pressure. If the discharge current is increased from 20 mA to 500 mA, then the intensity of oscillations increases too and it has two maxima. The intensity of these oscillations in the discharge increases to the anode when the sharp maximum of intensity of the high-frequency oscillations is observed near the cathode.
