

Б. Н. ШВИЛКИН

### НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ БЕСТОКОВОЙ ПЛАЗМЕ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 22 II 1971)

В ряде экспериментальных работ (<sup>1-3</sup>) было обнаружено, что в бестоковой слабоионизованной плазме в магнитном поле происходит раскачка дрейфовых и ионно-звуковых колебаний, предсказанных теоретически в (<sup>4, 5</sup>). Эти колебания существуют при низких давлениях газа, а их частота  $\omega$  больше частоты столкновений ионов с нейтральными атомами  $\tau_{in}^{-1}$  (<sup>4</sup>).

В настоящей работе найдено, что в бестоковой плазме высокочастотного разряда в магнитном поле раскачка колебаний может иметь место также в случае, когда частота колебаний  $\omega < \tau_{in}^{-1}$ . Эти колебания возникают в плазме с немагнитными ионами и не могут быть объяснены действием дрейфово-диссипативного механизма (<sup>6, 7</sup>).

В опытах плазма создавалась в стеклянной цилиндрической трубке длиной 100 и диаметром 2,8 см, помещенной в однородное магнитное поле, создаваемое соленоидом длиной 60 см. Для зажигания разряда применялся высокочастотный генератор, индуктивно связанный с электродами трубки и имеющий симметричный выход относительно земли. Мощность генератора 400 вт, частота 6,6 Мгц. Electroдами служили либо медные диски диаметром 3 мм, либо кольца шириной 1,5 см, охватывающие разрядную трубку снаружи у ее торцов. Измерения проводились в аргоне и криптоне в интервале давлений от 0,1 до 0,002 мм рт. ст. Для регистрации колебаний, генерируемых в плазме в магнитном поле, использовались панорамные спектроанализаторы С4-8 и С4-12, сигналы на вход которых поступали через узкополосные LC-фильтры, либо со стеночных молибденовых зондов, либо со световодов. В последнем случае сигналы предварительно усиливались с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Распространение волн в плазме изучалось посредством двух ФЭУ и осциллографа С1-16.

Измерения показали, что дрейфовые колебания обнаруживаются в плазме в магнитном поле только в том случае, когда их частота  $\omega \gtrsim \tau_{in}^{-1}$ . Верхнее граничное давление для существования дрейфовых колебаний ( $p_{гр}$ ) достаточно хорошо определяется условием:  $(T_e/M_i)^{1/2} \kappa \tau_{in} \gtrsim 1$  (<sup>8</sup>), где  $T_e$  — температура электронов,  $M_i$  — масса ионов,  $\kappa^{-1} = \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dr}\right)^{-1}$  — характерный размер неоднородности плазмы.

При давлениях  $p \gtrsim p_{гр}$  в плазме наблюдается раскачка новых колебаний с частотой  $\omega < \tau_{in}^{-1}$ . Эти колебания распространяются в азимутальном направлении и образуют стоячую волну вдоль оси разрядной трубки. Продольная длина волны во всех испытанных случаях оказывается приблизительно равной расстоянию между электродами.

На рис. 1а представлена зависимость частоты колебаний  $\omega$  с волновым азимутальным числом  $m = 2$  от магнитного поля  $B$  для аргоновой плазмы при давлении  $p = 1,6 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Из рисунка видно, что колебания в плазме возникают при увеличении магнитного поля до значения  $B = 440$  гс. С ростом поля  $B$  до 560 гс их частота уменьшается от  $1,8 \cdot 10^5$  до  $\approx 2 \cdot 10^4$  сек<sup>-1</sup>. В узком интервале магнитных полей от 570 до 590 гс колебания исчезают, а при увеличении магнитного поля выше

590 гс они снова обнаруживаются на частоте  $\omega \approx 2 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ . При дальнейшем росте магнитного поля частота колебания увеличивается и при  $B = 1500 \text{ гс}$  достигает значения  $\omega = 2,7 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ . Отметим, что для колебаний с падающей зависимостью  $\omega = f(B)$  их распространение происходит в сторону вращения электронов в магнитном поле, а для колебаний с растущей зависимостью  $\omega$  от  $B$  — в сторону вращения ионов. На рис. 1б приведена зависимость амплитуды колебательных сигналов со стеночного зонда, находящегося под плавающим потенциалом, от магнитного поля. Как видно из рисунка, в интервале изменения магнитного поля от 440 до 1500 гс

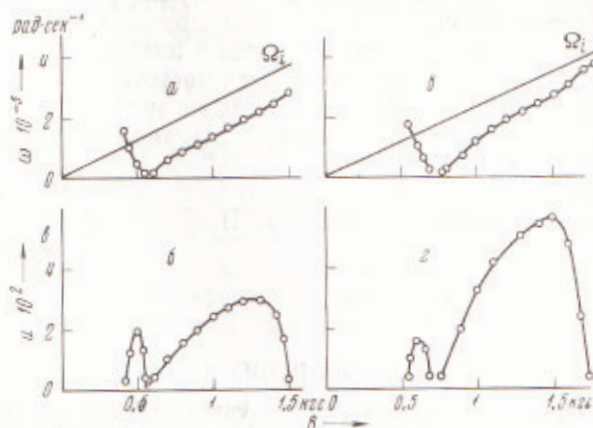
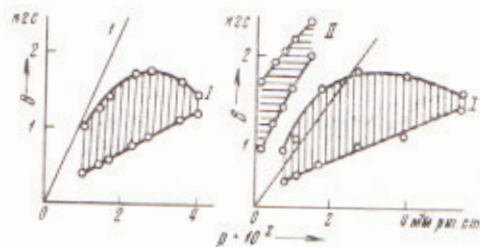


Рис. 1. Зависимости частот колебаний  $\omega$  (а и в) и амплитуд переменного сигнала с плавающего зонда  $u$  (б и г) от магнитного поля в аргонной и криптоновой плазмах. Азимутальное волновое число  $m = 2$ . Радиус трубки 1,4 см. Переменное напряжение между электродами 1200 в. а, б — аргон,  $P = 1,6 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.; в, г — криптон,  $P = 3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.

амплитуда колебаний имеет два явно выраженных максимума. Зависимости частоты и амплитуды колебаний от магнитного поля для криптоновой плазмы при давлении  $P = 3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. качественно аналогичны и изображены на рис. 1в и г. Характерно, что частота колебаний  $\omega$

Рис. 2. Границы существования колебаний по магнитному полю ( $B$ ) и давлению ( $P$ ) в криптоновой (а) и аргонной (б) плазмах. Азимутальное волновое число  $m = 2$ . Радиус трубки 1,4 см. Переменное напряжение между электродами 1200 в. I — области существования низкочастотных колебаний с  $\omega < \tau_{in}^{-1}$ ; II — область существования дрейфовых колебаний. I —  $\Omega_i \tau_{in} = 1$



всегда оказывается меньшей или, по крайней мере, порядка величины  $\tau_{in}^{-1}$ , которая для изображенных на рис. 1 случаев равна приблизительно  $2,6 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$  для аргонной и  $5 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$  для криптоновой плазмы соответственно (2).

На рис. 2 вертикальной штриховкой обозначены области существования описанных здесь колебаний с волновым азимутальным числом  $m = 2$  по магнитному полю и давлению для криптоновой (а) и аргонной (б) плазм (области I). Прямые линии (1), проходящие через начала координат, соответствуют значению  $\Omega_i \tau_{in} = 1$ , где  $\Omega_i$  — ионная циклотронная частота. Ясно видно, что раскачка колебаний при увеличении магнитного поля в областях I происходит в плазме в режиме, когда ионы не замагничены  $\Omega_i \tau_{in} < 1$ .



Горизонтальной штриховкой на рис. 2б обозначена область существования дрейфовых колебаний с  $m = 2$  (область II). Их раскачка происходит при условии  $\Omega\tau_{in} > 1$ .

Следует отметить, что (рис. 2б) в аргоновой плазме в некоторой узкой области давлений вблизи  $p_{cr}$  при одном и том же давлении наблюдаются как дрейфовые, так и низкочастотные колебания. Однако раскачка дрейфовых колебаний происходит при больших магнитных полях. При этом (см. выше) для дрейфовых колебаний выполняется условие  $\omega \gtrsim \tau_{in}^{-1}$ , а для низкочастотных колебаний справедливо обратное неравенство  $\omega \lesssim \tau_{in}^{-1}$ .

Таким образом, колебания, наблюдаемые в области I, не могут быть отнесены к дрейфовым, поскольку они имеют другой характер зависимости частоты от магнитного поля, раскачиваются в плазме с незамагниченными ионами ( $\Omega\tau_{in} < 1$ ), а их частота  $\alpha$  меньше частоты столкновений ионов с нейтральными атомами  $\tau_{in}^{-1}$ . Эти колебания не могут быть отождествлены также и с ионно-звуковыми колебаниями (<sup>1</sup>, <sup>6</sup>), так как частота последних должна быть больше  $\tau_{in}^{-1}$ .

В заключение автор выражает благодарность А. А. Зайцеву и А. В. Тимофееву за интерес к работе, а также Т. П. Блиновой за помощь при измерениях.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
26 I 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Б. Н. Швилкин, С. А. Постников, Радиотехника и электроника, 15, 2647 (1970). <sup>2</sup> В. А. Вдовин, В. Д. Русанов, Д. А. Франк-Каменецкий, Ядерный синтез, 6, 169 (1966). <sup>3</sup> D. R. Pigache, G. N. Harding, Plasma Phys., 11, 805 (1969). <sup>4</sup> Б. Н. Швилкин, Т. Л. Блинова, С. А. Постников, Радиотехника и электроника, в печати. <sup>5</sup> В. А. Вдовин, В. Д. Русанов, Д. А. Франк-Каменецкий, Письма ЖЭТФ, 10, 120 (1969). <sup>6</sup> А. В. Тимофеев, ДАН, 152, 84 (1963). <sup>7</sup> Б. Б. Кадомцев, Вопросы теории плазмы, 4, 1964, стр. 188. <sup>8</sup> С. Браун, Элементарные процессы в плазме газового разряда, М., 1961.