

ОСЦИЛЛЯЦИИ ТОКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ

Г.М. Баташов, В.А. Силин

Экспериментально изучаются колебания тока быстрых электронов, возникающих при падении СВЧ волны на слой плазмы. Увеличение надпороговости приводит к изменению частоты колебаний от 22 до 4 МГц. Явление объясняется на основе представлений нестационарной теории ленгмюровской турбулентности.

В экспериментах по нелинейному взаимодействию СВЧ излучения с неоднородным плазменным слоем регистрировалась аномальная прозрачность плазменного слоя, возникновение ускоренных электронов и появление комбинационных линий в рассеянном излучении [1]. Эти факты позволили сделать заключение о возникновении параметрической неустойчивости в данных экспериментальных условиях. При дальнейшем развитии работы нами были предприняты меры к более детальному изучению неустойчивости, а именно, было увеличено временное разрешение аппаратуры при измерениях электронных токов. Это позволило наблюдать новое явление – нестационарность электронной турбулентности, возникающей в бесстолкновительной плазме.

Измерение токов электронов проводилось с помощью расположенного внутри плазменного слоя многосеточного зонда, экранированного от воздействия СВЧ поля. Нагрузкой коллектора зонда служило сопротивление 50 ом, таким образом, электрическая цепь зонда, а также, усилитель и регистрирующая аппаратура обеспечивали временное разрешение до 25 МГц. Как и в упоминавшихся экспериментах, мощная электромагнитная волна 10-сантиметрового диапазона включалась в тот момент времени, когда концентрация электронов в центре плазменного слоя достигает максимального значения. При этом регистрируется

появление тока быстрых электронов, которые возникают в том случае, если максимальная концентрация электронов в слое равна или больше критической для падающего излучения. Указанное явление характеризуется порогом по мощности падающего излучения равным 100 квт , что соответствует напряженности поля в падающей волне в месте расположения зонда 360 в/см , или отношению $v_E/v_{Te} = 0,3$, (v_{Te} — начальная тепловая скорость электронов, $v_{Te} = 10^8 \text{ см/сек}$, $v_E = eE_0/m\omega_0$).

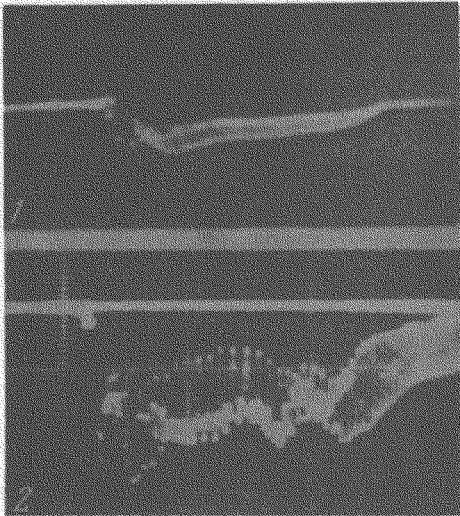


Рис. 1. Осциллограммы тока ускоренных электронов: 1 — электрическое поле падающей волны 1 кв/см (надпороговость $a^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{\text{пор}}}{E_0} \right) = 0,32$), 2 — поле падающей волны $1,5 \text{ кв/см}$ ($a^2 = 0,38$) развертка осциллографа 1 мксек/деление

Обнаружено, что электронный ток на зонд имеет осциллирующую компоненту (см. рис. 1). Эта компонента имеет значительную протяженность во времени, практически сравнимую с полным временем существования электронного тока, т. е., со временем распада плазменного слоя, вызываемого воздействием мощного СВЧ поля. Время возникновения электронного тока составляет величину около $0,1 \text{ мксек}$, что совпадает с длительностью переднего фронта СВЧ импульса, это время почти не изменяется в диапазоне мощностей падающей волны, которые соответствуют электрическому полю от 360 до 1750 в/см .

Глубина модуляции (m , %) электронного тока в зависимости от мощности падающей волны характеризуется резким порогом, также равным 100 квт , и далее сохраняется на уровне около 40% (см. рис. 2). При больших мощностях глубина модуляции имеет слабо выраженную тенденцию к уменьшению. Интересной особенностью наблюдаемого процесса является изменение частоты осцилляций при изменении уровня мощности падающей волны. Из рис. 1 следует, что при небольшом превышении мощности над порогом неустойчивости частота осцилляций заметно больше 20 Мгц и даже не поддается измерению с помощью использованной аппаратуры (усилитель С1-15/1 с осциллографом С8-9А). С увеличением надпороговости частота осцилляций падает, это иллюстрирует рис. 3, закон ее изменения близок к $f_{\text{осц}} \sim \ln \frac{E_{\text{пор}}^2}{E_0^2}$. В наших

измерениях регистрировались частоты от 22 вплоть до 4 МГц, т. е. в этот интервал могут быть включены осцилляции 5 МГц, про которые упоминалось в работе [2], посвященной изучению аналогичной плазмы, помещаемой в волновод 10-сантиметрового диапазона волн, это может говорить о сходстве протекающих в плазме процессов в данных экспериментах.

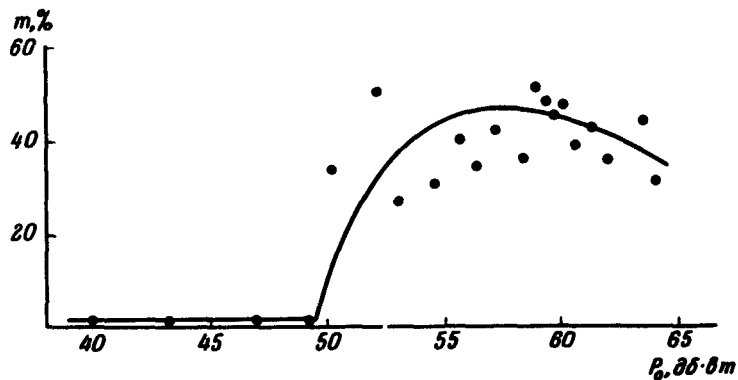


Рис. 2. Зависимость глубины модуляции электронного тока от мощности падающей волны: масштаб по оси абсцисс логарифмический; порог возникновения осцилляций 360 в/см. Кривая соответствует интервалу времени 1,0 + 1,5 мксек от момента включения падающей волны

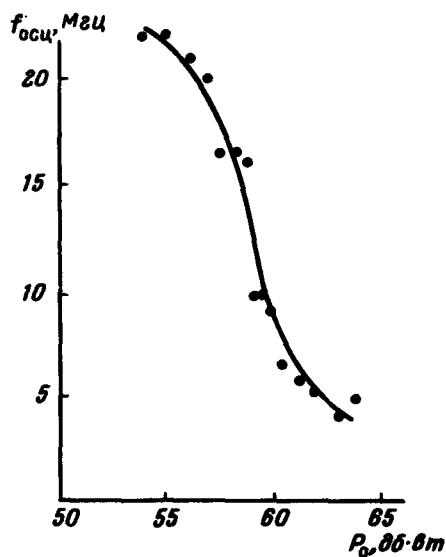


Рис. 3. Зависимость частоты осцилляций от мощности падающей волны: кривая построена для интервала времени 1,0 + 1,5 мксек

Наблюдаемые осцилляции можно было бы объяснить возникновением интенсивной звуковой волны и связанной с ней модуляцией локального потенциала плазмы. Однако, такое объяснение не подтверждается эк-

спериментом, так как выключение падающей волны, производимое в середине импульса электронного тока, приводит к быстрому (около $0,1 \text{ мксек}$) исчезновению и электронного тока и его модуляции, в то время как декремент затухания звуковой волны должен, по крайней мере, быть меньше ее частоты. Кроме того, звуковые волны, возникающие при потенциальной периодической неустойчивости, имеют волновое число $k_s \gg k_0$ и зонд размером около 1 см не может реагировать на мелкомасштабные изменения концентрации. Следовательно, можно сделать вывод о том, что наблюдаемые осцилляции связаны с турбулентным состоянием электронов. Осцилляции такого состояния теоретически предсказаны в работах [3, 4]. Качественное сравнение с теорией [4] показывает, что в наших экспериментальных условиях время развития турбулентности составляет $t_T = 2 \cdot 10^{-8} \text{ сек}$, время выхода турбулентности на стационарное значение $t_\infty \approx 10^5 \text{ сек}$, частота осцилляций $f_{\text{осц}} = 6 \cdot 10^6 \text{ 1/сек}$. Наблюдаемое в эксперименте уменьшение частоты осцилляций при возрастании надпороговости можно объяснить уменьшением бесстолкновительного затухания плазменных волн (γ) с ростом их амплитуды, тем не менее, сравнение не может выйти за рамки качественного, поскольку использованная теория развита для случая, когда $\beta \gg 1$, а в эксперименте $\beta \sim 1$, (β^{-1} – масштаб ядра в угловом распределении энергии шумов). Кроме того, цитированная работа [4] относится к случаю распада волны накачки на два плазмона, а в наших условиях более низкий порог имеет неустойчивость по отношению к образованию плазменной и ионно-звуковой волны.

Авторы признательны М.С. Рабиновичу за внимание к работе, Н.Е. Андрееву и В.В. Пустовалову за полезное обсуждение результатов.

Физический институт
им. П.Н. Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 апреля 1974 г.

Литература

- [1] Г.М. Батанов, В.А. Силин. Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой. Труды ФИАН СССР, М., изд. Наука, 73, 87, 1972.
- [2] В.И. Баринов, И.Р. Геккер, В.А. Иванов, Д.М. Карфидов. XI Междунар. конф. по явлениям в ионизир. газах. Прага, 1973; Препринт ФИАН СССР №89, 1973.
- [3] W.L. Krueger, E.J. Valeo. Phys. Fluids, 16, 5, 675, 1973.
- [4] Н.Е. Андреев, В.В. Пустовалов, В.П. Силин, В.Т. Тихончук. Письма в ЖЭТФ, 18, 624, 1973.