

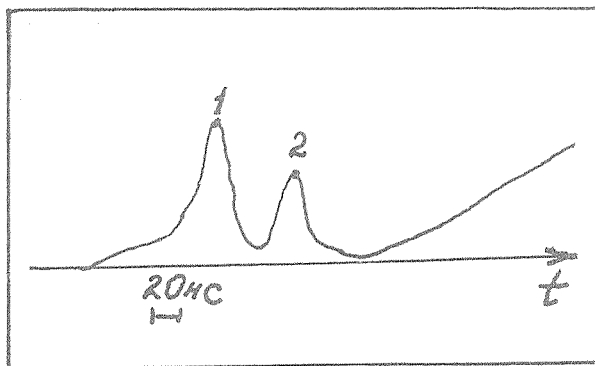
О ГАРМОНИКАХ НАДТЕПЛООВОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА

В.А. Грибков, С.И. Исаков, А.Б. Романов

УДК 621.378.9

Работа посвящена исследованию надтеплового излучения плазменного фокуса вблизи плазменной частоты и ее второй гармоники в инфракрасной области спектра.

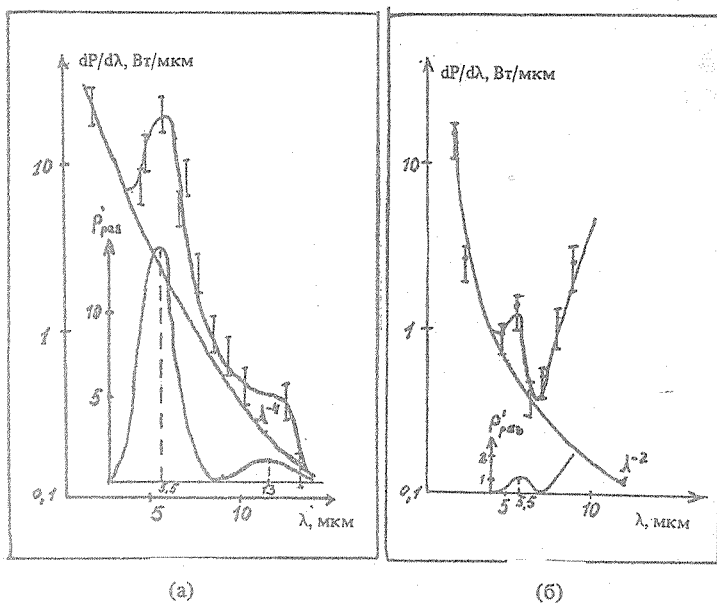
В [1] было зарегистрировано надтеплое инфракрасное (ИК) излучение плазменного фокуса, имеющее характерный диапазон длин волн от 2 до 11 мкм. В настоящее время имеются более детальные результаты по исследованию этого излучения с временным и спектральным разрешениями (рис. 1).



Р и с. 1. Временная зависимость интенсивности излучения

В его спектре можно выделить два пика: $\lambda_1 \approx 10$ мкм ($\omega \approx 1,9 \cdot 10^{14}$ с⁻¹) — первая гармоника и $\lambda_2 \approx 5$ мкм (2ω) — вторая гармоника. Промежуточный минимум приходится на $\lambda \approx 7$ мкм. В различных сериях разрядов, т. е. при небольшом изменении начальных условий (давления рабочего газа, напряжения питания батареи конденсаторов плазменного фокуса и пр.) максимумы $\lambda_{1,2}$ изменяются в пределах от 2 до 4 мкм, но каждый раз частоты оказываются кратными.

ИК излучение исследовалось в режимах с одним и двумя сжатиями. Наибольшая статистика накоплена в случае работы ПФ с двумя сжатиями. Эволюция спектров (т. е. зависимость спектральных интенсивностей первой I_{ω} и второй $I_{2\omega}$ гармоник от времени) коррелирует с эволюцией разряда и нейтронным выходом установки. При этом первый и второй максимумы (рис. 2) интенсивности надтеплового ИК излучения практически совпадают с импульсами жесткого рентгеновского излучения, первый из которых связан с "убеганием" электронов при сжатии на оси камеры цилиндрической ударной волны, несущей часть тока, а второй — с явлением "обрыва" основного тока, протекающего по токовой оболочке.



Р и с. 2. ИК спектр излучения плазменного фокуса для серий 33, 34 (а) и серий 16, 17 (б). На вставке: $P'_{\text{раз}}$ — разность регистрируемого спектра и спектра излучения черного тела

Эксперимент показал, что по мере увеличения нейтронного выхода установки интенсивность второй гармоники нарастает и начинает превышать интенсивность первой. Как показали проведенные ранее исследования, увеличение нейтронного выхода ПФ сопровождается, как правило, увеличением

энергии и абсолютного выхода жесткого рентгеновского излучения.

Таблица 1

Отношение интенсивностей гармоник излучения плазменного фокуса

Тип приемника	Номер серии	Точка на осциллограмме (рис. 1)	Нейтронный выход, н/имп	$I_{2\omega}/I_{\omega}$
GeZn	33,34,40	1	$(6\div 8) \cdot 10^8$	43 ± 2
GeZn	33,34,40	2	$(6\div 8) \cdot 10^8$	45 ± 2
GeAu	36-39	1	$(1\div 2) \cdot 10^8$	$0,5 \pm 0,1$
GeAu	36-39	2	$(1\div 2) \cdot 10^8$	$4,0 \pm 0,6$
GeAu	16,17	1	$(0,6\div 0,9) \cdot 10^8$	$0,12 \pm 0,02$
GeAu	13,14	2	$(6\div 9) \cdot 10^7$	$0,07 \pm 0,02$
GeAu	13,14	1	$(6\div 9) \cdot 10^7$	$0,04 \pm 0,02$

В тех сериях (табл. 1, серии 33, 34, 40), когда выход нейтронов был максимальным и составлял $(6-8) 10^8$ н/имп, интенсивность второй гармоники значительно превышала интенсивность первой на протяжении всего разряда. При этом отношение максимумов $I_{2\omega}$ и I_{ω} оказывается одинаковым как для первого, так и для второго сжатия. Такую ситуацию можно объяснить, если предположить установление в этом режиме изотропной плазменной турбулентности, развивающейся в области анодной плазмы (где концентрация $n_e \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$). В этом случае отношение интенсивностей гармоник может быть выражено формулой [2]:

$$\frac{I_{2\omega}}{I_{\omega}} = \frac{12\pi}{\sqrt{3}} \frac{n_e c^3}{\omega_{pe}^3} \left\langle \left| \frac{v_p^l}{c} \right|^3 \right\rangle \left\langle \frac{v_p^l}{v_{Te}} \right\rangle \frac{W^l}{n_e m_e c^2}, \quad (1)$$

где ω_{pe} — плазменная частота; v_p^l — фазовая скорость ленгмюровских волн; v_{Te} — тепловая скорость электронов; n_e , m_e — соответственно плотность и масса электронов; c — скорость света.

Отметим, что в формуле (1) использовались разные механизмы генера-

ции излучения на частоте ω и частоте 2ω . Излучение на частоте ω возникает за счет трансформации ленгмюровских волн в поперечные на электронах плазмы ($1 + e \rightarrow t + e'$), а излучение на частоте 2ω — за счет слияния двух ленгмюровских волн ($1 + 1 \rightarrow t$) /3/. При этом суммарный вклад второго процесса в случае изотропной ленгмюровской турбулентности может быть больше, чем суммарный вклад первого, что и наблюдается в данном эксперименте. Из сопоставления (1) с экспериментальным значением $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 40$ следует, что спектральная плотность энергии плазменной турбулентности $W^1 \approx 4 \cdot 10^4$ эрг/см³ ($ct \sim 3$ см $\gg L$), т. е. реализуется случай спонтанного рассеяния. Учитывая энергосодержание в потоке электронов $\epsilon_b = n_e m_e u_b^2 \approx \approx 2,5 \cdot 10^9$ эрг/см³, можно сделать вывод, что уровень шумов довольно низок: $\epsilon_b \gg W^1$.

Мощность надтеплого шума в случае анизотропной турбулентности может быть оценена по формуле, следующей из (1): $I_{\omega} = 10^5 W^1$, что при постановке численного значения и при учете геометрии эксперимента дает величину, сравнимую с экспериментально измеряемой $I_{\omega} \approx 10$ Вт/мкм²·ср.

Во втором режиме (с малым нейтронным выходом $(6-9) \cdot 10^7$ н/имп, серии 13, 14) картина оказывается противоположной: на протяжении разряда первая гармоника интенсивнее второй $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 10^{-2}$ как при первом, так и при втором сжатии. Это возможно объяснить на основе модели анизотропной плазменной турбулентности ($I_{2\omega}/I_{\omega} < 1$).

В данном случае отношение интенсивностей гармоник не зависит от плотности плазменных колебаний

$$I_{2\omega}/I_{\omega} = 15 v_p v_{Te}/c^2 \approx 15 u_b v_{Te}/c^2 \quad (2)$$

и равно $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 0,65$ при $v_{Te} \approx 2 \cdot 10^9$ см/с ($T_e \sim 1$ кэВ); $u_b \approx 2 \cdot 10^{10}$ см/с ($\epsilon_e = 100$ кэВ).

Сравнение с экспериментальным значением $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 10^{-2}$ показывает, что характерная энергия электронов в потоке в этом режиме меньше 100 кэВ и температура электронов меньше 1 кэВ.

Интересно отметить в (2) отсутствие зависимости от плотности пучка, что, возможно, проявляется в постоянстве $I_{2\omega}/I_{\omega}$ на протяжении разряда.

Несколько отличается от описанных режим, наблюдавшийся в сериях 16, 17, где нейтронный выход по порядку величины также $(6-9) \cdot 10^7$ н/имп, но $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 0,1$, что по порядку величины сравнимо с теоретическим значением $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 0,65$.

Интересен переходный режим (серии 36-39 с промежуточным значением

нейтронного выхода $(1\div 2) \cdot 10^8$ н/имп). В первом сжатии (точка 1, рис. 1) наблюдается анизотропная турбулентность $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 0,5$, а во втором (точка 2, рис. 1) — уже изотропная $I_{2\omega}/I_{\omega} \approx 4$.

На основе полученных результатов и проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. надтепловые шумы ПФ связаны с взаимодействием рождающихся в этой установке мощных электронных потоков с прианодной плазмой;

2. спектры гармоник этого надтеплового излучения могут быть объяснены на основе представлений о ленгмюровской турбулентности: анизотропной — в случае малого нейтронного выхода (спонтанное рассеяние ленгмюровских волн на электронах) и изотропной — в случае большого нейтронного выхода (взаимодействие ленгмюровских волн);

3. плотность энергии ленгмюровских волн низка, так что данный процесс не может объяснить ни аномальную релаксацию мощных электронных потоков в ПФ, наблюдаемую экспериментально [1], ни изотропизацию самой ленгмюровской турбулентности, возникающую в случае большого нейтронного выхода.

Авторы благодарны О.Н. Крохину за обсуждение работы.

Поступила в редакцию 31 апреля 1984 г.

После переработки 24 сентября 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Грибков и др. Труды ФИАН, 127, 33 (1980).
2. R.E. Aamodt, W.F. Drumond. Plasma Phys., 6, № 2, 147, 1964.
3. В.Н. Цытович. Теория турбулентной плазмы. М., Атомиздат (1971).
4. С.А. Каплан, С.Б. Пикельнер, В.Н. Цытович. Физика плазмы солнечной атмосферы. М., Наука, 1977.