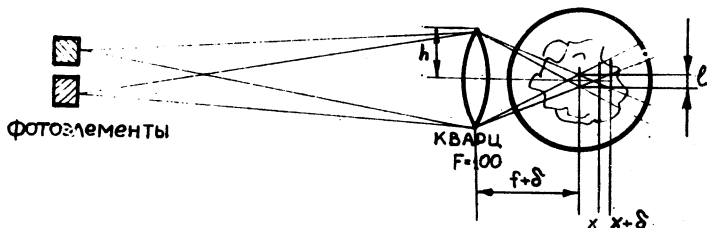


**ФЛУКТУАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРООБЪЕМОМ
ЛИТНЕВОГО РАЗРЯДА**

А. Д. Клементов, В. Е. Розанов

В ранее выполненных работах /1/ - /3/ были исследованы характеристики сильноточного разряда в литневой плазме, такие как мощность, излучаемая в различных спектральных интервалах, пространственные распределения плотности и температуры плазмы в зависимости от времени. Плазма разряда оптически прозрачна и характеризуется средней плотностью 10^{18} см⁻³ и температурой порядка 30000°К. Теоретический анализ показывает, что литневая плазма с указанными параметрами неустойчива по отношению к перегревной неустойчивости. В результате развития этой неустойчивости температура и плотность плазмы будут пространственно неоднородны, движение неоднородностей проявится в флуктуациях излучения отдельных малых объемов плазмы. Отметим, что полное излучение разряда плавно изменяется с изменением разрядного тока, отличается стабильностью и воспроизводимостью /1/. Флуктуации магнитных полей в указанной плазме наблюдались с помощью магнитных зондов в течение первой четверти периода разрядного тока (0-35 мксек), в дальнейшем временные зависимости становились плавными. С помощью корреляционной обработки этих результатов были определены характерные размеры неоднородностей, скорости их перемещения, масштаб флуктуаций температуры оценен на основании размерных формул /5/. В данной работе колебания плазменных величин исследуются с помощью оптических методов, достоинство которых заключается в том, что они в отличие от зондов не вносят возмущений в плазму. В эксперименте непосредственно наблюдается сигнал от плазменной неоднородности, обработка осциллограмм позволяет определить размеры и скорость перемещения неоднородности, а также оценить масштаб изменения плотности. Схема эксперимента и характерные

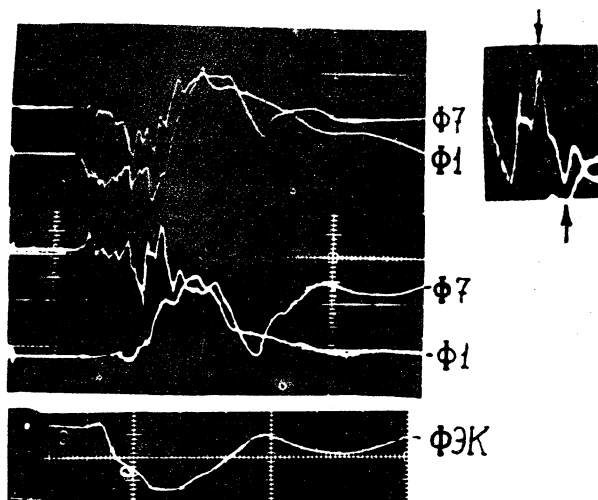
осциллограммы показаны на рис. 1,2. Кварцевая линза (фокусное расстояние $f = 100$ мм) с 47-кратным увеличением проецирует сечение разрядного шнура на плоскость, в которой установлены три пары фотоэлементов, регистрирующих излучение в различных спектральных интервалах: ФЖ (1,38–1,98 эв), Ф1 (2,25–3 эв), Ф7 (4,4–



Р и с. 1. Схема эксперимента.

5,1 эв); временная разрешающая способность схемы регистрации — $2 \cdot 10^{-7}$ сек /6/. Сигнал фотоэлемента в случае оптически прозрачной плазмы определяется излучением объемов плазмы, лежащих внутри конусов, показанных на рис. 1. В эксперименте два одиночных фотоэлемента с одинаковыми характеристиками расположены так, что их области резкой фокусировки в плазме отстоят друг от друга на расстоянии $l = 0 - 3$ см, причем при регистрации сигнал одного фотоприемника вычитается из сигнала другого. Можно показать, что в случае однородноизлучающей оптически прозрачной плазмы плазменный слой ($x, x + \Delta x$), расположенный внутри конуса, создает одинаковый вклад в излучение, регистрируемое приемником, независимо от расстояния от этого слоя до плоскости резкой фокусировки (см. рис. 1). Если же плазма излучает неоднородно, то энергия, попадающая в фотоприемник, будет существенно зависеть от того, находится ли неоднородность вблизи области резкой фокусировки ($x = 0$) или вне ее; в последнем случае сигнал фотоприемника будет меньше в отношении $\approx \Delta x h^2 / x^2 f^2$, где Δx — размер неоднородности, h — диаметр линзы ($\Delta x < x$). Поскольку у одиночных фотоэлементов показания вычитаются, результирующий сигнал существенно отличен от нуля лишь в том случае, когда неоднородность находится в области резкой фокусировки; в частности, если неоднородность движется через области резкой фокусировки обоих фотоэлемен-

тов, на осциллограмме возникает характерные пики противоположной полярности. Пример такого сигнала показан на рис. 2. Время τ между максимумами таких сигналов позволяет определить скорость



Р и с. 2. Типичные осциллограммы разностных сигналов фотоэлементов. На увеличенном участке осциллограммы показан пример прохождения сгустка через области регистрации фотоэлементов Ф7.

неоднородности $v = l/\tau$, где l - известное расстояние между областями режой фокусировки. Длительность сигнала Δt определяет размер неоднородности: $\Delta x = \Delta t l/\tau$. Эти соотношения верны для случая $\Delta x < l$, если же $\Delta x > l$, то $v = \Delta x/\tau$, а $\Delta t = l/v$. Анализ осциллограмм, полученных при различных l , показывает, что все неоднородности меньше 1 см и при $l > 1$ см реализуется первый случай. Таким образом, из измерений флуктуаций излучения можно определить характерные размеры неоднородностей и скорость их перемещения.

В эксперименте применялись абсолютно калиброванные фотоэлементы. Это позволяет по величине амплитуды сигнала оценить излучательную способность плазмы и, в конечном итоге, характерный масштаб флуктуаций плотности плазмы. Величина энергии, попадающей в фотоприемник при излучении неоднородности, имеющей сферичес-

кую форму (диаметр Δx), и находящейся в области резкой фокусировки этого фотоэлемента, определяется соотношением

$$J \left(\frac{\text{эрг}}{\text{сек}} \right) = S_{\text{фп}} \frac{1}{4} \langle \varepsilon_{\lambda} \Delta x \rangle \frac{n^2 \delta^2}{4r^4},$$

$S_{\text{фп}}$ - площадь фотоприемника, ε_{λ} эрг/см³ сек эв - излучательная способность плазмы в области частот ν , $\nu + d\nu$ при ширине спектрального интервала I эв, δ - расстояние от точки резкой фокусировки до фокальной точки.

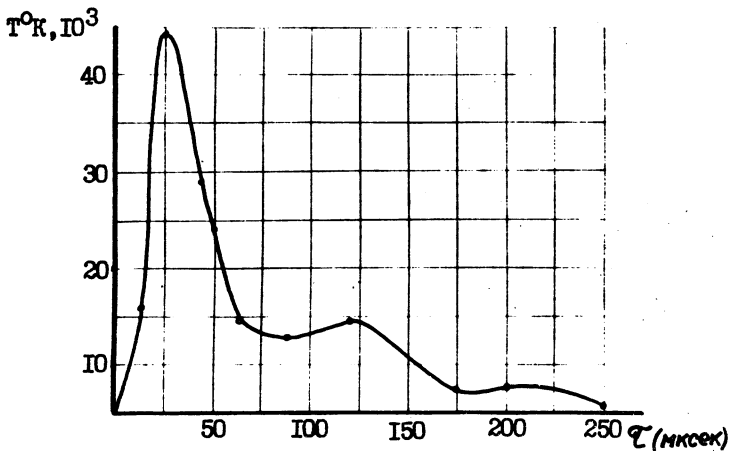
Из этого соотношения видно, что по величине сигнала можно оценить излучательную способность ε_{λ} . В таблице I приводятся расчетные данные /7/ по излучательной способности ε_{λ} эрг/см³ сек эв литиевой плазмы в интервале энергий фотонов $h\nu = 4,8$ эв., $\Delta h\nu = I$ эв (соответствующем области чувствительности приемника Ф7) в зависимости от температуры и плотности.

Таблица I

$n, \text{см}^{-3}$ / $T, \text{эв}$	1,77	3,16	5,6
10^{17}	$1,05 \cdot 10^9$	$8,3 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^9$
10^{18}	$9,1 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$1,05 \cdot 10^{11}$
10^{19}	$6,2 \cdot 10^{12}$	$6,8 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{12}$

Средняя по диаметру разряда температура плазмы измерялась с помощью абсолютно калиброванных фотоэлементов, чувствительных в красной и инфракрасной областях /6/. В этих областях плазма имеет большую оптическую толщину и излучает как абсолютно черное тело. Результаты измерений представлены на рис. 3. Из графика видно, что в первой четверти периода разрядного тока, когда наблюдаются флуктуации излучения, температура плазмы меняется в пределах 30000-40000°K. В этих условиях излучательная способность слабо зависит от температуры и примерно квадратично от плотности (таблица I). Таким образом, амплитуда сигнала $j(t)$ связана с величиной n^2 , а точнее с оптической толщиной неоднородности $\langle n^2 \Delta x \rangle = \int n^2 dx$. Значение n^2 , которое достигается в центре неоднородности, определяется формой сигнала $j(t)$, для определения

d^2 следовало бы решать задачу Абеля подобно тому, как это сделано в /3/. Мы определим Δn в среднем по центральной части неоднородности, имеющей линейный размер $\Delta x/2$, равный половине



Р и с. 3. Зависимость средней по сечению разряда температуры от времени.

полного размера неоднородности Δx . В таблице 2 приводятся характерные размеры неоднородности, скорости их перемещения и величина флуктуаций плотности, определенные по двойным сигналам, соответствующим прохождению неоднородности через области резкой фокусировки обоих фотоприемников. Такая обработка осциллограмм позволяет определять размеры и скорости с хорошей точностью, величина плотности при этом определяется более грубо.

В последнем столбце приводятся данные работы /5/, полученные с помощью корреляционной обработки осциллограмм магнитных

Таблица 2

	Данная работа	Работа /5/
Размер неоднородности, см	0,2-0,6	0,9
Скорости перемещения, км/сек	2-10	10
Плотность n , см ⁻³	$2 \cdot 10^{17}$ - 10^{18}	$2 \cdot 10^{18}$

зондов. Величина Δl в /5/ непосредственно не измеряется, а получается путем пересчета с помощью формул, выведенных из соображений размерности. В /5/ отмечается тот факт, что интегральная по спектру излучательная способность плазмы в эксперименте примерно в 4–5 раз выше, чем по расчету. Учет этого обстоятельства приведет к понижению Δl примерно в 2 раза. Как видно из таблицы, соответствие результатов является удовлетворительным, подтверждая картину неустойчивостей разрядной плазмы, описанную в работах /5/, /8/. Поскольку оптические методы, в отличие от зондовых, в принципе не вносят в плазму никаких возмущений, наблюдаемое затухание флуктуаций как магнитных полей, так и излучения связано с изменением свойств самой плазмы. Стабилизация перегретой неустойчивости может происходить за счет излучения в линиях примесей, которые поступают в плазму со стенок камеры и электродов. Как отмечалось ранее /1/, линейчатое излучение существенно проявляется в спектре (при сохранении интенсивности непрерывного спектра) после максимума тока.

Отметим еще один качественно понятный результат. Наиболее изрезанный характер имеет осциллограмма датчика Ф7, для которого плазма наиболее оптически прозрачна. Сигнал, записанный ФЭК^{ом}, свидетельствует о большой оптической толщине плазмы в красной области спектра. Этот сигнал определяется главным образом внешними слоями плазмы, находящимися вне области резкой фокусировки (рис. 1), и поэтому по форме он соответствует осциллограмме излучения всего разряда /1/.

Поступила в редакцию

26 июня 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов, Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. ТВТ, 8, 736 (1970).
2. Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. Препринт ФИАН № 99, Москва, 1971 г.
3. А. А. Вехов, Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов. Препринт ФИАН № 79, Москва, 1971 г.

4. В. Б. Розанов, А. А. Рухадзе. Препринт ФИАН № 132, Москва, 1969 г.
5. Ф. А. Николаев, Ю. В. Новицкий, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. Препринт ФИАН № 21, Москва, 1972 г.
6. А. Д. Клементов, В. В. Еремин. Препринт ФИАН № 127, Москва, 1971 г.
7. А. Ф. Никифоров, В. Б. Уваров. Препринт ИГиМ АН СССР № 36, Москва, 1969 г.
8. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов, Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. Препринт ФИАН № 126, Москва, 1969 г.