

СИЛОВЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОГО САМОСЖАТОГО
РАЗРЯДА В ПЛОТНОЙ ОПТИЧЕСКИ НЕПРОЗРАЧНОЙ ПЛАЗМЕ

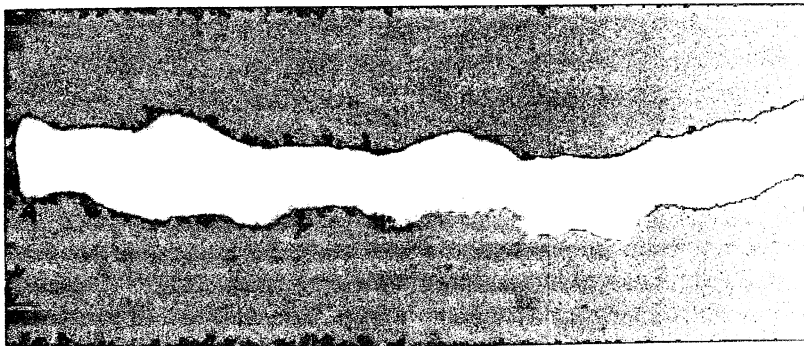
А. Ф. Александров, В. В. Зосимов, И. Б. Тимофеев

Необходимость создания все более интенсивных источников света для накачки лазеров ультрафиолетового диапазона вновь привлекла внимание исследователей к поведению плотной плазмы, образующейся при электрическом взрыве проводников. В настоящее время достаточно подробно исследована динамика и равновесие таких разрядов /1-3/, однако об их устойчивости имеются только полуколичественные результаты /4/. В настоящем сообщении приводятся результаты исследования силовых неустойчивостей сильноточных самосжатых разрядов в плотной оптически непрозрачной плазме, образованной электрическим взрывом в вакууме металлических проволочек.

Эксперименты проводились на установке с емкостным накопителем энергии, состоящей из 24 конденсаторов типа ИМ-50-3, период разрядного тока составлял 25 мксек. Разрядная камера представляла собой два плоских электрода, помещенных внутри кварцевой колбы диаметром 10 см на расстоянии 25 см. Между электродами натягивались проволочки из алюминия, меди, серебра или вольфрама диаметром $0,09 \pm 0,14$ мм. Перед взрывом проволочек камера откачивалась до давления не хуже 10^{-5} мм рт. ст. В экспериментах батарея конденсаторов заряжалась до различных напряжений, вплоть до 20 кв, причем в этом последнем случае амплитуда разрядного тока составляла 160 ка.

Из СФР-грамм и спектрограмм разряда определялась зависимость среднего радиуса разряда и его яркостной температуры от времени. Эти результаты оказались в полном соответствии с результатами работы /5/, а именно, вблизи момента первого максимума тока имелась хорошо выраженная стадия магнитного удержания плазмы (средний радиус разряда при этом составлял около 1,2

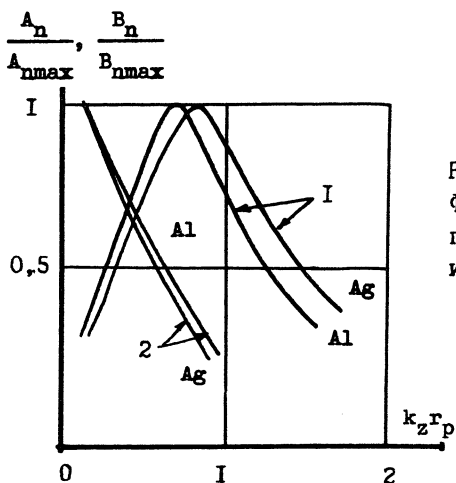
см), характер излучения разряда соответствовал излучению черного тела, температура вблизи этого момента изменялась слабо и имела величину около 2 эв. В этой стадии разряда и проводилось изучение характера неустойчивостей, развивающихся в плазменном шнуре.



Р и с. I. Внешний вид разряда с развитой неустойчивостью
($d_1, d = 0,14$ мм, $U_0 = 20$ кв).

На рис. I представлена типичная фотография разрядного канала с сильно развитой неустойчивостью, полученная при взрыве алюминиевой проволоочки. На фотографии прекрасно видно, что разрядный канал сильно изогнут и имеет волнистую поверхность. Здесь сразу же следует оговориться, что наблюдаемый на фотографии сильный общий изгиб разрядного шнура не связан ни с возможными начальными возмущениями в самой проволочке, ни с возможной несимметрией включения разрядной камеры, что установлено специальными экспериментами. Такой внешний вид разряда полностью соответствует предсказаниям теории /6/ о том, что в линейном z -пучке возможно развитие перетяжечной ($m = 0$) и винтовой неустойчивостей ($m \neq 0$). При этом, как следует из рисунка, вид винтовой неустойчивости должен соответствовать развитию ее основной моды. Далее производилось отделение винтовых (изгибных) возмущений от перетяжечных. Возможность такого отделения непосредственно связана с тем очевидным обстоятельством, что перетяжечные возмущения симметричны относительно оси разряда (ось z), а винтовые возмущения вызывают смещение самой оси

разряда, т.е. приводят к несимметричным относительно оси z возмущениям. Обработка СФР-грамм производилась для моментов времени, соответствующих $4+7$ мксек, когда разрядный канал находится в равновесии. Обработка заключалась в снятии зависимости радиального положения границ разряда r относительно оси камеры (ось z) и выделении из этой зависимости симметричной и несимметричной относительно оси z частей возмущения цилиндрической формы канала разряда. Затем полученные таким образом



Р и с. 2. Зависимость амплитуд Фурье-компонент возмущений перетяжечного типа (кривые 1) и винтового типа (кривые 2) от параметра $\alpha = k_z r_p$.

функции $r(z)$ с помощью анализаторов Мадера разлагались в ряд Фурье, причем имелась возможность вычислять до 25 коэффициентов этого ряда. Разложение велось по гармоникам пространственного периода, равного удвоенной длине разрядного промежутка. Как видно непосредственно из фотографии разряда, на электродах разрядного промежутка располагаются пучности перетяжечной неустойчивости и узлы винтовой. Поэтому разложение в ряд Фурье аксиально симметричных (перетяжечных) возмущений велось по косинусам (коэффициенты разложения B_n), а для изгибных (винтовых) возмущений – по синусам (коэффициенты разложения A_n). Помимо приведенного физического обоснования справедливость такого разложения подтвердил и полный Фурье-анализ нескольких выборочных СФР-грамм.

На рис. 2 представлена зависимость величин A_n/A_{nmax} (для изгибов) и B_n/B_{nmax} (для перетяжек) от безразмерного параметра

$k_z r_p$, где k_z — волновое число для соответствующей гармоники r_p — как обычно, равновесный радиус плазменного шнура для момента времени, соответствующего 5-ой микросекунде). Аналогичные кривые можно получить и для других моментов времени (нами производилась обработка СФР-грамм для 6-ой и 7-ой микросекунд, соответствующих стадии магнитного удержания разряда). Из приведенных кривых видно, что неустойчивость типа перетяжек имеет максимальную амплитуду для гармоник, соответствующих $k_z r_p \approx = (0,7 \div 0,9) \leq 1$. Для винтовых неустойчивостей максимальна амплитуда возмущений с $k_z r_p \approx 0,15$, что соответствует $k_z = \pi/1$, т.е. длине волны возмущений, равной удвоенной длине разрядного промежутка.

Из сравнения величины амплитуд максимальных гармоник для различных моментов времени рассчитывались инкременты развития γ соответствующих мод неустойчивостей. Полученные из СФР-грамм взрыва алюминиевых, медных, серебряных и вольфрамовых проволок инкременты представлены на рис. 3 как функции атомного веса элемента взрываемой проволоки. Экспериментальные точки обозначены кружочками, а соответствующие кривые — пунктиром; при этом кривая 1 соответствует перетяжкам, а кривая 2 — изгибам. Из кривых следует, что инкременты развития неустойчивостей падают примерно пропорционально \sqrt{A} , т.е. \sqrt{M} (M — масса иона), а следовательно, они пропорциональны скорости звука. Это находится в хорошем согласии с предсказаниями теории. Для количественного сравнения результатов эксперимента с теорией вычислялись теоретические значения γ по формуле

$$\gamma = \sqrt{k_z r_p} \frac{v_s}{r_p} = \frac{v_s}{r_p}$$

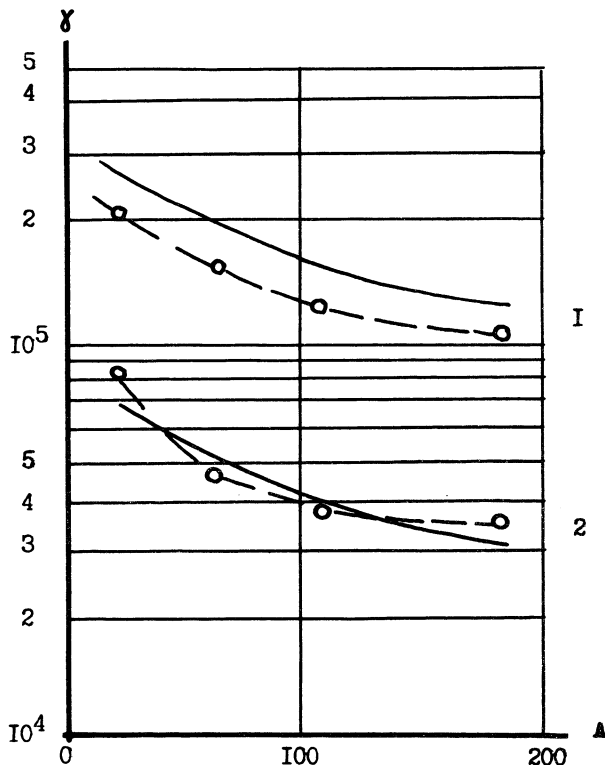
для перетяжек и

$$\gamma = k_z v_s$$

для винтовой неустойчивости. Соответствующие результаты представлены на рис. 3 сплошными линиями. Видно очень хорошее совпадение экспериментальных и теоретических кривых.

Резюмируя, можно сказать, что проведенный анализ устойчивости линейного z -пинча в оптически непрозрачной плазме показал, что максимальным инкрементом обладают неустойчивости типа перетяжек, соответствующие значению $k_z r_p \approx 1$. Винтовые

неустойчивости обладают меньшим (более чем в 3 раза) инкрементом, чем перетяжечные, причем наиболее быстро развиваются моды с $k_{zr} = 0,15 \ll 1$, т.е. длинноволновые возмущения. Экспериментальные результаты полностью подтверждают правильность выводов теории.



Р и с. 3. Зависимость инкремента развития перетяжечных (кривые 1) и винтовых (кривые 2) неустойчивостей от атомного веса элемента взрываемой проволоки. Штриховые кривые - эксперимент, сплошные кривые - теория.

Авторы благодарны А. А. Рухадзе за обсуждение результатов работы и ценные советы и А. Сапрыкину за помощь в обработке результатов.

Поступила в редакцию
1 ноября 1971 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. Ф. Александров, В. В. Зосимов, А. А. Рухадзе, В. И. Савоскин, И. Б. Тимофеев. III Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы, Москва, 1971 г. краткое содержание докладов стр. 176-179.
2. А. Д. Клементов, Г. В. Михайлов, Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. ТВТ, 8, 736 (1970), Труды IX Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Бухарест, 1969 г. стр. 350.
3. В. Б. Розанов, А. А. Рухадзе. Обзорный доклад на IX Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Бухарест, 1969 г.
4. Ф. А. Николаев, В. Б. Розанов, Ю. П. Свириденко. Краткие сообщения по физике, № 4, 59 (1971).
5. А. Ф. Александров, В. В. Зосимов, А. А. Рухадзе, В. И. Савоскин. Краткие сообщения по физике, № 6, 58 (1970).
6. А. Ф. Александров, А. А. Рухадзе, С. А. Тригер. Труды IX Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Бухарест, 1969 г., стр. 379.