

ИОНИЗАЦИОННЫЙ КОЛЛАПС ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ НИТИ В ПЛОТНОМ ГАЗЕ

*В.Г.Аветисов, С.И.Грицинин, А.В.Ким¹⁾, И.А.Коссыл,
А.Ю.Костинский, М.А.Мисакян, А.И.Надеждинский,
Н.М.Тарасова, А.Н.Хуснутдинов*

Путем прямого экспериментального наблюдения установлен факт "взрывообразного" нарастания до "экстремально высоких" значений электронной концентрации плазменной нити, возникающей в плотном газе под действием сильного высокочастотного поля.

Как показано в ¹⁻³, разряд в газах повышенного давления возбуждаемый сильным высокочастотным полем, характеризуется дроблением ионизованной области на регулярно или хаотически расположенные тонкие (в масштабе длины электромагнитной волны) нитевидные плазменные образования (высокочастотные плазменные нити), вытянутые преимущественно вдоль вектора высокочастотного электрического поля. Сведения о параметрах плазмы в нитевидных структурах чрезвычайно ограничены, а механизм их формирования практически не выяснен. В последнее время активный интерес к нестационарным плазменным объектам, обнаруженным в высокочастотных разрядах, вызвали теоретические исследования ⁴, предсказавшие режим взрывного возрастания параметров плазмы с последующим насыщением роста ^{5, 6} в структурах типа уединенных нитей. Полученные в теории экстремально высокие значения электронной концентрации, значительно превосходящие величину критической плотности $n_c = m(\omega^2 + \nu^2) / 4\pi e^2$ (ω – частота поля, ν – частота электронных соударений), и температуры электронов ($T_{e\max} \gtrsim 10$ эВ) позволяют предполагать, что нитевидный разряд является уникальным плазменным образованием, не имеющим аналогов среди описанных в литературе высокочастотных разрядов. В настоящей работе впервые про-

¹⁾ Институт прикладной физики АН СССР.

ведено прямое экспериментальное измерение параметров высокочастотной плазменной нити с высоким временным разрешением, позволяющим судить также о времени его формирования и продолжительности жизни.

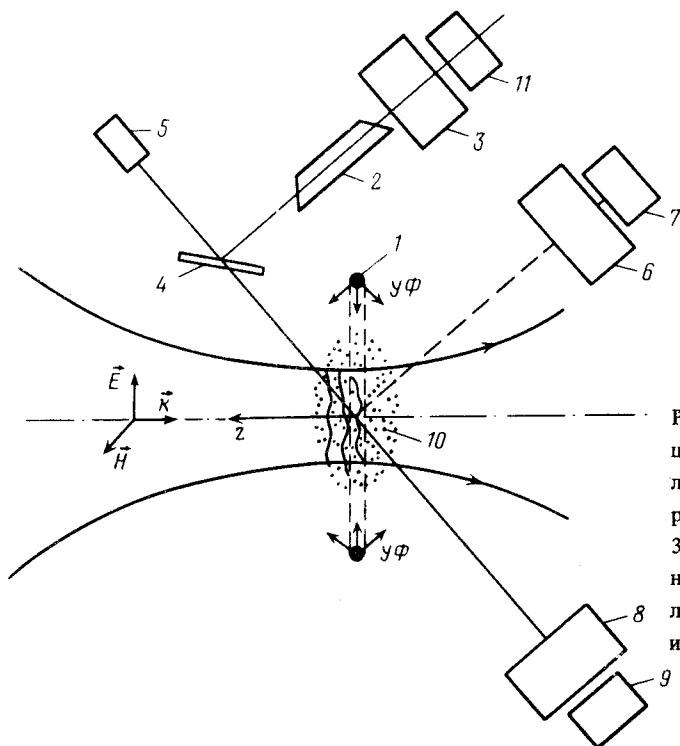


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – кольцевой источник ионизирующего УФ излучения; 2 – трубка с тлеющим разрядом; 3, 6, 8 – монохроматоры МДР-3; 4 – делительная пластина; 5 – диодный лазер; 7, 9, 11 – ФЭУ; 10 – область взаимодействия СВЧ излучения с ионизованным газом

Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рис. 1. В качестве рабочего газа использовались аргон или ксенон. Кольцевой источник ионизирующего излучения создавал слой почти однородной плазмы с концентрацией электронов $n_{e0} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В ионизованный газ (при давлении $70 \leq p \text{ (торр)} \leq 760$) вводился пучок электромагнитных волн линейной поляризации. Длина волны $\lambda \approx 2 \text{ см}$, импульсная мощность $P \leq 500 \text{ кВт}$, длительность импульса $\tau \leq 100 \text{ мкс}$. Через некоторое время после включения электромагнитного импульса регистрируется яркая вспышка света в первоначально слабо светящейся и слабоионизованной области (степень ионизации $\leq 5 \cdot 10^{-7}$). Фотографирование (интегральное и с разверткой по времени) показывает, что вспышка связана с появлением нитевидных плазменных образований, поперечный размер которых $d \leq 0,3 \text{ мм}$. Характерное время их жизни (время свечения) оказывается порядка 2 – 3 мкс.

Для определения электронной концентрации в нити применены спектральные методы диагностики: пассивная, связанная с регистрацией собственного излучения в видимой области спектра, и активная, основанная на просвечивании ионизованной области пучком диагностического лазерного излучения в ИК диапазоне. Оба метода предназначены для определения концентрации электронов по штарковскому уширению линий⁷, регистрируемых в спектрах излучения или поглощения.

Линии в спектре собственного излучения, имеющего характер вспышки, совпадающей с появлением плазменных нитей, выделялись монохроматором МДР-3 и регистрировались ФЭУ (рис. 1). На рис. 2а приведены характерные формы линий $\text{AgI} (7030 \text{ \AA})$ и $\text{XeI} (4671 \text{ \AA})$, которые, как видно, сильно уширены и асимметричны. Предполагая, что источником излучения (и областью поглощения), где формируется профиль линии, являются ярко светящиеся нити и, используя штарковские константы этих линий, можно вычислить концентрации электронов n_e , которые в обоих газах (Ag и Xe) оказываются приблизительно равными $n_e \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

В методе активной спектроскопии применен перестраиваемый "диодный" лазер, работающий в частотном интервале, перекрывающем линию ArI (8668 \AA) (переход ${}^3P_0(4s_3) - {}^3D_1(4p_7)$). К несомненному преимуществу метода следует отнести чрезвычайно высокое спектральное разрешение ($\delta\lambda < 0,01 \text{ \AA}$) при удовлетворительном временном ($\delta t \leq 0,1 \text{ мкс}$) и пространственном ($\delta r \approx 5 \text{ мм}$), обусловленным размером диагностирующего пучка, а также высокая чувствительность. Для измерений лазерный пучок разделялся на два: один направлялся

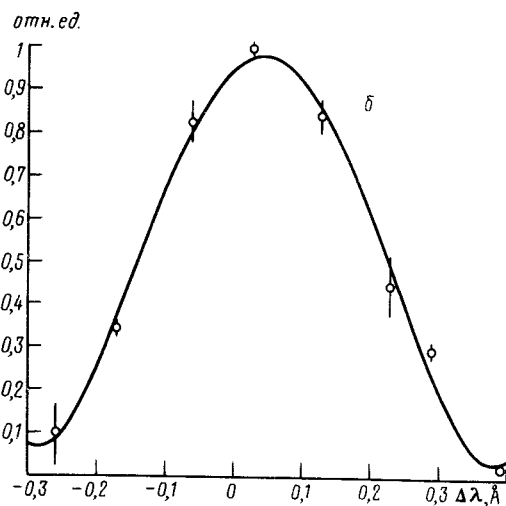
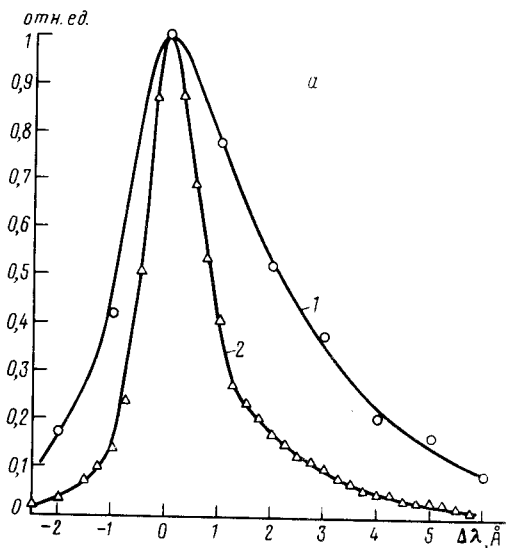


Рис. 2. а – Профили линий излучения, снятые при $p = 300$ торр, $S = 40 \text{ кВт/см}^2$ в аргоне (1) – Ar I ($\lambda_0 = 703 \text{ нм}$) и ксеноне (2) – Xe I ($\lambda_0 = 467,1 \text{ нм}$); б – профиль линии поглощения в аргоне с метастабильного уровня (переход ${}^3P_0(4s_3) - {}^3D_1(4p_7)$). $\lambda_0 = 866,8 \text{ нм}$

в вакуумную камеру и проходил через исследуемую ионизованную область, второй пропуск – кался через тлеющий разряд, зажигаемый в трубке, наполненной аргоном (реперный сигнал, соответствующий несмещенному – "нулевому" – положению линии поглощения). Типичный вид профиля линии поглощения приведен на рис. 2б. Графики зависимостей n_e , вычисленных по полуширине линии, от начального давления и плотности мощности излучения показаны на рис. 3. Необходимо подчеркнуть, что используемые спектральные методы определяют величину n_e , усредненную как по числу линий в области наблюдения, так и по времени их жизни.

Таким образом, проведенные измерения показывают, что концентрация электронов в нити возрастает с исходного уровня $n_{e0} \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до значений $n_e > 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (с учетом вытеснения газа степень ионизации может приближаться к единице), значительно превышающих n_c ($n_c \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$), за время $\tau \leq 0,5 \text{ мкс}$ и тем самым подтверждают реализу-

емость коллапсирующей (взрывной) формы развития (ионизационного коллапса) высокочастотной плазменной нити в плотном газе. Значения плотности плазмы, достигаемые при

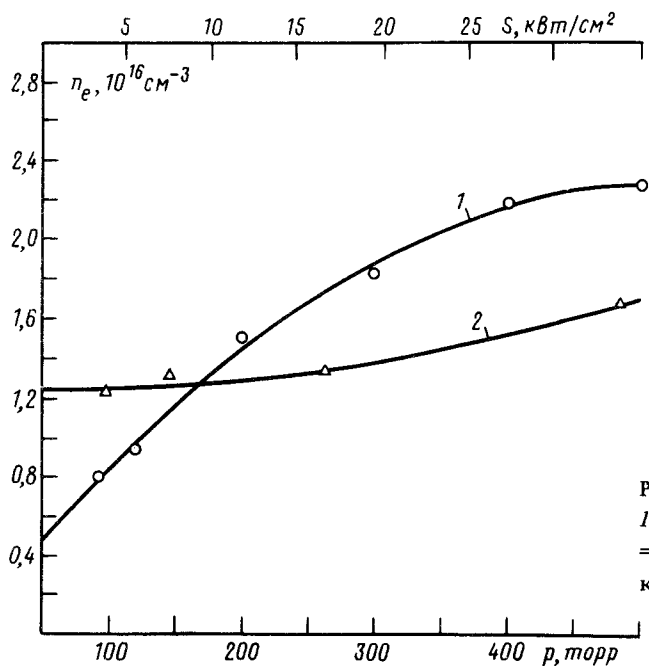


Рис. 3. Графики зависимостей n_e от: 1 — Начального давления газа при $S = 20$ кВт/см²; 2 — от плотности потока мощности S при $p = 200$ торр

этом, столь велики, что появляется возможность выполнения резонансных условий для ионных плазменных (или ионно-звуковых) волн и, следовательно, возможность параметрического механизма диссипации высокочастотной энергии. Отметим также два важных обстоятельства, с неизбежностью возникающих при развитии нитей, способных оказать существенное влияние на ход ионизационных процессов в целом. Во-первых, сочетание высокой плотности и электронной температуры (среднее значение T_e , измеренное в экспериментах, составило несколько эВ) делают плазменные нити источником интенсивного ультрафиолетового излучения, и, во-вторых, значительные локальные энерговыделения (по оценкам порядка 100 Дж/см³) за столь малые времена ($\leq 0,5$ мкс) должны приводить к генерации сильных ударных волн.

Литература

1. Батанов Г.М. и др. Труды ФИАН, М.: Наука, 1985, **160**, 174.
2. Богомолов Г.Л. и др. ЖЭТФ, 1987, **93**, 519.
3. Вихарев А.Л. и др. ЖЭТФ, 1988, **94**, 136.
4. Ким А.В., Фрайман Г.М. Физика плазмы, 1983, **9**, 601.
5. Коган Е.Я., Кузин Б.Ю. ПМТФ, 1988, **3**, 28.
6. Боколишвили И.Б. и др. Препринт ИПМ АН СССР, 1989, **86**,
7. Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978.