

04; 09; 12

© 1992

ФОТОРАЗВЕРТКА РАЗРЯДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
В ВОЛНОВОМ ПУЧКЕЛ.П. Грачев, И.И. Есаков,
Г.И. Мишин, К.В. Ходатаев,
В.В. Цыпленков

Фотографирование импульсного СВЧ разряда в волновом пучке в воздухе при давлении $p \approx 100$ Тор и длительности импульса (t_M) в десятки мкс с временем экспозиции $t_3 > t_M$ фиксирует сложное сплетение каналов [1-3]. Его скоростная съемка [4] подтвердила результаты работы [5] о том, что разряд формирует растущие и разветвляющиеся плазменные шнуры - каналы, и выявила наличие „базовых элементов” - вибраторов. В настоящей работе также приведены кадры скоростной фоторазвертки разряда, позволяющие уточнить его динамiku.

Разряд изучался в следующих условиях [6]. Линейно-поляризованное ТЕМ излучение с длиной волны $\lambda = 8.5$ см и $t_M = 40$ мкс фокусировалось в барокамере. Представим декартовы координаты, начало которых совмещено с фокусом, ось x направлена по E , z - по волновому вектору, а y - перпендикулярна \vec{E} . В фокальной плоскости по x и y изменение модуля амплитуды E имеет вид $E = E_0 e^{-(x/a)^2}$ и $E = E_0 e^{-(y/b)^2}$, где $a = 5.2$ см, $b = 2.5$ см и $E_0 = 5.5$ кВ/см. При смещении от фокуса вдоль z на +5 и -2.5 см E спадает на 20%. Для инициирования разряда [7] в фокус помещался свинцовый шар радиусом $R = 1.25$ мм на леске диаметром 10^{-2} мм, натянутой по y . В течение импульса шар подсвечивался ультрафиолетом с интенсивностью около 10^{-4} Вт/см² в диапазоне 240-400 нм. Освещение его полюсов с координатами $x = \pm R$ было примерно одинаковым. Воздух пробивался при $p = 330$ Тор.

На рис. 1 дана фотография разряда с $t_3 > t_M$. На ней показан масштаб. Излучение поступает слева. Стрелками указано положение шара. С правой стороны разряд имеет максимальный поперечный размер вдоль лески. На рис. 2 для него же даны пронумерованные кадры фоторазвертки с $t_3 = 1.5$ мкс. Кадры 1-5 являются первыми с момента пробоя. Время между ними $t_K = 1.9$ мкс. Шестой - отстоит от первого на 20.9 мкс. Стрелками указано положение шара. Его размер служит масштабом. Излучение идет слева. Поле E направлено вертикально.

Фоторазвертка позволяет проследить развитие разряда.

Рассмотрим кадр 1. В эксперименте исходное (в отсутствие пробоя) поле меньше критического [8] $E_K = 40p = 13.2$ кВ/см везде

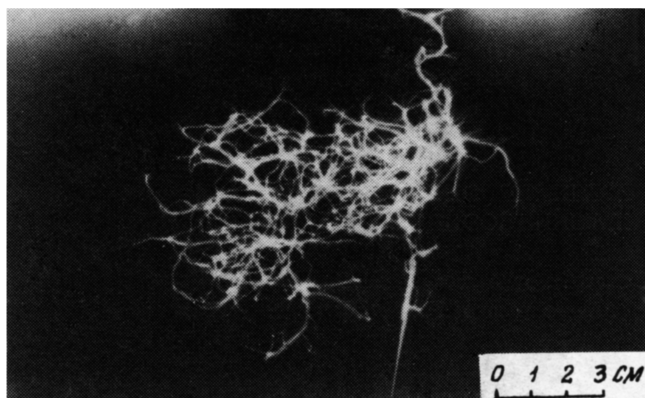


Рис. 1. Фотография разряда с временем экспозиции большим, чем длительность импульсного СВЧ разряда в волновом пучке в воздухе при $P \gg 100$ Тор. Излучение поступает слева.

кроме приполярных областей шара, где на его поверхности $E = 3E_0 > E_K$. Кадр 1 фиксирует, что разряд начинается с них и за время, не большее t_K , вдоль E „отрастают“ каналы длиной 8 мм и радиусом $r = 1$ мм со средней скоростью $\bar{v} \geq 4 \cdot 10^5$ см/с. Они имеют структуру „плотного“ ядра с ореолом.

Оценим некоторые их параметры. Частота столкновений электронов (с энергией около 1 эВ) с молекулами: $\nu_c = 4 \cdot 10^9 \rho = 10^{12}$ с $^{-1}$. Круговая частота поля: $\omega = 2 \cdot 10^{10}$ с $^{-1} \ll \nu_c$. Концентрация, при которой сравниваются действительный и мнимый члены диэлектрической проницаемости $\epsilon = 1 - i \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}$ ($\sigma = \frac{n_e q_e^2}{m_e \nu_c}$ - проводимость плазмы, n_e - ее концентрация, $\epsilon_0 = 10^{-9}/36 \cdot \pi$ Ф/М, $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг, $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ К): $n_0 = \frac{\epsilon_0 m_e \omega \nu_c}{q_e^2} = 6 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. В квазистатике внутри „вытянутого“ плазмоида $E_{in} = E_0$, а на его концах $E_{out} = |\epsilon| E_{in}$ [9]. Скорость его роста (с фиксированным n_e): $v_K = 2 \sqrt{D_a(\nu_i - \nu_a)}$, где $D_a = 1.4 \times 10^4 / \rho = 40$ см 2 /с - коэффициент амбиполярной диффузии, $\nu_a = 2 \cdot 10^4 \rho = 6.6 \cdot 10^6$ с $^{-1}$ - частота прилипания, и $\nu_i = \nu_a \left(\frac{E}{E_K}\right)^{5.3}$ - частота ионизации при $1.3 \leq \frac{E}{E_K} \leq 3$. Считая, что ионизация идет при E_{out} , и приняв $v_K = \bar{v}$, получим n_e на концах каналов: $n_K \approx 7 n_0 = 4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Определенное влияние на v_K и r может оказать излучение из разряда с масштабом спада фотоионизации перед его границей [10]: $z_{\varphi} = 10^3 / \rho = 0.3$ см.

Кадр 2 фиксирует рост плазмоида вдоль E до длины $h = 33$ мм, „вспышку“ его центральной части на длине около 22 мм при $r = 1.5$ мм и разветвление и загиб концов.

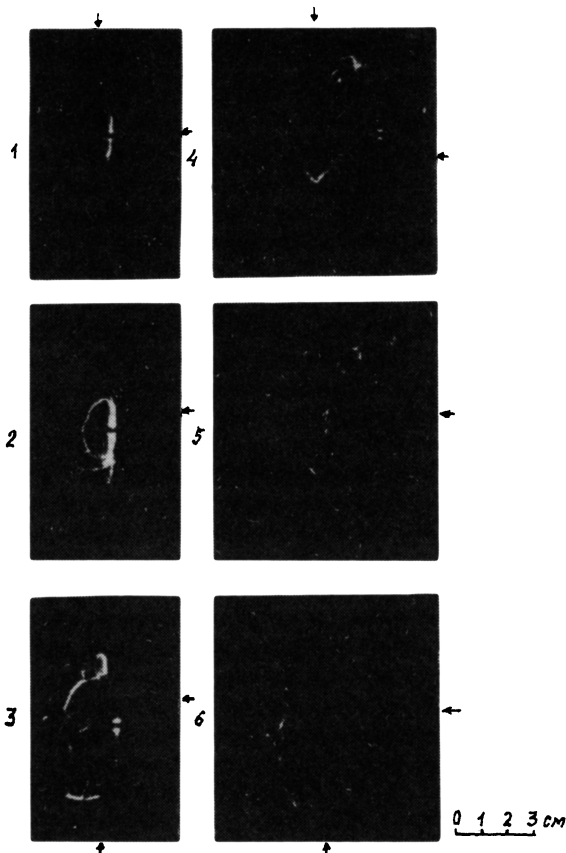


Рис. 2. Последовательные пронумерованные кадры фоторазвертки с временем экспозиции 1.5 мкс. Время между первыми пятью кадрами 1.9 мкс. Шестой кадр отстоит от первого на 20.9 мкс. Излучение поступает слева.

Представим плазмод в виде вибратора, параллельного \vec{E} . Ток вдоль него в гармоническом приближении [11]: $J = J_0 \frac{\cos kx - \cosh h/2}{1 - \cosh h/2}$, где $k = 2\pi/\lambda$, $J_0 = E_0 h g / \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$, $h g = 2h/\pi$ - его действующая длина, R_0 и X_0 - эквивалентные активное и реактивное сопротивления. J_0 имеет максимум в области $\frac{\lambda}{4} < h < \frac{\lambda}{2}$ при $R_0 \approx X_0$. Считая, что наблюдаемая h резонансная, а $R_0 = \frac{1}{\sigma} \frac{h g}{\pi r^2}$ и $X_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot (\ln \frac{h}{2r} - 1) \operatorname{ctg} \frac{kh}{2}$ [8] ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), получим $\sigma = 30 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $n_e = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $R_0 = 100 \text{ Ом}$. Эксперимент [5] показал, что в разрядных шнурах есть участки с термической ионизацией. Полагая, что она реализуется именно в яркой области вибратора, по оцененной n_e получим температуру газа там - $7 \cdot 10^3 \text{ К}$ [8]. Для такого нагрева объема $h g \pi r^2$ требуется

энергия $W=0.5$ Дж. Мощность, поглощаемая вибратором, $P = \frac{J_0^2 R_0}{2} = 3.4 \cdot 10^5$ Вт ($J_0 = \frac{E_0 h g}{\sqrt{2} R_0} = 82$ А), т.е. нагрев происходит за время $W/P=1.5$ мкс $< t_K$. Оно соизмеримо с временем выравнивания давления $\tau/\nu_T = 1$ мкс, где $\nu_T = 1.5 \cdot 10^5$ см/с — скорость звука при $7 \cdot 10^3$ К, т.е. „вспышка“ может идти с образованием ударной волны. Это подтверждает эксперимент [12].

В резонансе около плазмоида его собственное поле больше E_0 . На кадре 2 видно, что именно по его силовым линиям идет дальнейшее развитие разряда. У его концов $E > E_K$ уже в значительной области. В [13] показано, что граница ионизации при скорости, большей критической, неустойчива к изгибам. В этом случае фронт разряда, перемещаясь по области с $E > E_K$, размеры которой вдоль него больше масштаба неустойчивости, распадается на каналы, что и фиксирует кадр 2. Этот процесс обуславливает не повторяющуюся геометрию разряда. Скорость прорастания каналов, определяемая формулой для ν_K , больше оцененной $\bar{\nu}$. Для сомкнувшихся каналов на кадре 2 она не менее 10^6 см/с.

На кадре 3 отсутствуют ранее яркий плазмод и сомкнувшиеся каналы. Можно предположить, что именно последние, образовав новый вибратор, кондуктивно и индуктивно связанный с родительским, „погасили“ его. В общем случае, в выражении для J_0 вместо R_0 и X_0 должно стоять $R = R_0 + R_K + R_U$ и $X = X_0 + X_K + X_U$, где индексы соответствуют виду связи. Если при наличии в шнурах, соединяющих вибраторы, участков, перпендикулярных исходному E , R_K и $X_K = 0$, то для параллельных вибраторов R_U и X_U могут быть значительными [11] и резко уменьшить ток в них.

На кадре 3 видно, что незамкнутые каналы продолжают расти в сложной суперпозиции поля исходного и собственного поля разряда. Когда их длина становится резонансной (при незначительном влиянии других каналов) они „вспыхивают“, начиная поглощать СВЧ энергию. С минимумом R_U и X_U и связано положение двух ярких участков, длиной (с учетом ракурса) примерно равной погасшему и не параллельных ему. Обратим внимание на возможность роста каналов не только по областям с $E < E_K$, но и с $E < E_K$, за счет электростатического усиления поля на их концах. В последнем случае, казалось бы, за фронтом ионизации плазма должна распаться за $1/\nu_a = 0.15$ мкс на длине $\nu_K/\nu_a = 1.5$ мм. В эксперименте же распад идет существенно медленнее. Например, на кадре 1 при $E_0 < E_K$ каналы выросли на 8 мм, оставаясь проводящими. Для выяснения причин такого „замедления“ требуются дальнейшие исследования.

Последующие кадры показывают, что многократное повторение изложенного сценария определяет процесс разряда в целом. Он развивается навстречу излучению, экранируя область фокуса.

Таким образом, СВЧ разряд высокого давления в волновом пучке, начинаясь с области, где выполнено условие пробоя, распространяется навстречу излучению в область с уровнем исходного поля меньше пробойного, в виде растущих и разветвляющихся плаз-

менных каналов. Их формирование определяет не только исходное поле, но и существенно превышающее его ближнее поле выросших каналов. По фронту разряда отдельные их фрагменты образуют интенсивно поглощающие СВЧ энергию резонансные вибраторы с термической ионизацией в их центральной части. Вибраторы последовательно экранируются вновь вырастающими каналами, которые за счет кондуктивной и индуктивной связи выводят их из резонанса.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 2. С. 389-391.
- [2] Батанов Г.М., Грицинин С.И., Коссы И.А., Магунов А.Н., Силаков В.П., Тарасова Н.М. // Труды ФИАН СССР. 1985. Т. 160. С. 174-203.
- [3] Бровкин В.П., Колесниченко Ю.Ф. // Радиофизика (научно-технический сборник). М.: МРТИ АН СССР. 1991. С. 71-79.
- [4] Баранов В.В., Бровкин В.Г. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 15. С. 39-43.
- [5] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б. // ЖТФ. 1989. Т. 59. В. 10. С. 149-154.
- [6] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. // Препринт 9005. М.: МРТИ АН СССР. 1990. 14 с.
- [7] Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В., Цыпленков В.В. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 3. С. 411-415.
- [8] Райзер Ю.М. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Госизд. физ.-мат. лит. 1959. 532 с.
- [10] Богатов Н.А., Голубев С.В., Зорин В.Г. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 14. С. 888-890.
- [11] Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия. 1975. 528 с.
- [12] Грачев Л.П., Есаков И.И., Мишин Г.И., Никитин М.Ю., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 5. С. 972-975.
- [13] Кириллов И.А., Русанов В.Д., Фридман А.А. // Доклады АН СССР. 1985. Т. 284. С. 1352-1355.