

УДК 533.9.07

ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВОДНАЯ МОДЕЛЬ ЛАВИННОГО МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ГАЗОВ

А. В. Шелоболин

В рамках плазменно-волноводной модели электрического пробоя газов на базе опубликованных ранее экспериментальных результатов оцениваются параметры волновода, соответствующего лавинному механизму пробоя.

В работе [1] из анализа экспериментальных результатов электрического пробоя газов (ЭПГ) при инициировании длинной лазерной искрой была предложена плазменно-волноводная модель (ПВМ), качественно объяснявшая наблюдаемые явления. Основное отличие этой модели от господствующей ныне состоит в том, что ПВМ предполагает, что волна ЭПГ является когерентной, а не фронтальной, то есть ее распространение в пространстве связано не с энергетическими процессами на фронте волны, а с фазовыми соотношениями во всем межэлектродном промежутке. ПВМ предполагает также, что на начальном этапе ЭПГ формируется цилиндрический канал повышенной ионизации, по которому и распространяется волна пробоя. Подобный канал может формироваться как внешним источником ионизации, так и в результате образования интерференционной картины в направлении, перпендикулярном внешнему электрическому полю. Аргументом в пользу ПВМ может служить эквидистантное расположение лавин на всех известных фотографиях многолавинных процессов с расстояниями между осями лавин порядка удвоенного диаметра лавины [2, 3]. Кроме того продольные денситограммы лавины имеют характерный провал [4], отмеченный также в [1] и идентифицированный там как центр волны, бегущей в плазменном волноводе. Наконец, простейшие оценки дебаевского радиуса экранирования r_D при фоновой плотности ионизации газа $N = 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-3}$ показывают, что еще до подачи напряжения на электроды $r_D = 0.8 - 2.5 \text{ см}$, то есть меньше типичных межэлектродных расстояний, указанных, например, в [3]. Эта оценка показывает, что наблюдаемые волны ЭПГ есть волны, распространяющиеся в плазме, для которой характерны когерентные процессы.

В настоящей работе на базе экспериментальных результатов [4] и в предположении, что лавина является потенциальной поверхностной волной с соответствующей дисперсионной характеристикой [5], оцениваются основные параметры плазменного волновода лавины.

Из денситограмм [4] можно определить, что расстояние от центра провала до переднего фронта лавины составляет 0.7 мм. Идентифицируя это расстояние как четверть длины продольной волны λ , а также устанавливая из [4], что радиус лавины равен $R = 0.2$ мм, можно оценить собственную частоту поверхностной волны плазменного волновода лавины ω , плазменную частоту Ω и соответствующую ей плотность носителей N . Считая, что скорость лавины равна фазовой скорости волны в плазменном волноводе, и принимая ее в соответствии с [4] как $v = 10^7$ см/с, из соотношений $\lambda = v/\nu$; $\omega = 2\pi\nu$ можно определить $\nu = 3.6 \cdot 10^7$ Гц; $\omega = 2.2 \cdot 10^8$ с⁻¹. Взяв из [5] для продольной поверхностной волны дисперсионную характеристику и решая ее относительно плазменной частоты Ω , можно получить

$$\Omega \simeq 2\pi \frac{v}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{2}{4\pi^2 \left(\frac{R}{\lambda}\right)^2 \ln\left(2\pi \frac{R}{\lambda}\right)}} \simeq \frac{v}{R} \sqrt{\frac{2}{\ln \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{R}}}. \quad (1)$$

При этом первое приближение в (1) соответствует условию $v \ll c$ ($c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с), что выполняется для лавины с большим запасом, а второе соответствует условию $\omega^2 \ll \Omega^2$, что тоже выполняется, но с меньшим запасом. Используя первое приближение (1) при указанных выше значениях параметров v , R , λ , взятых из [4], получим $\Omega = 8.2 \cdot 10^8$ с⁻¹. Соответствующая этому значению плотность носителей заряда будет $N = 2.3 \cdot 10^8$ см⁻³.

Это значение N качественно согласуется с анализом релаксационных процессов в плазме, проведенным в [6]. Там показано, что $N \simeq 10^8$ см⁻³ есть граница, начиная с которой включаются механизмы релаксации плазмы более быстрые, чем диффузия. Проведенные здесь оценки показывают, что лавинный механизм ЭПГ развивается вблизи этой границы, а оценка r_D при нормальной температуре показывает, что $R/r_D \simeq 3$.

В заключение следует отметить, что современная модель распространения лавины базируется на интерпретации фотографий лавин в камере Вильсона. Первые из таких фотографий относятся к 1935 году [7]. Однако все подобные фотографии в этом и во всех последующих экспериментах такого типа являются интегральными по времени. Соответственно их интерпретация допускает двойственное толкование по ряду параметров. В частности, конический хвост лавины можно интерпретировать не как диффузионное

расширение размножающегося электронного сгустка, а как диффузионную релаксацию плазмы на хвосте этого сгустка. Для разрешения этого и ряда других противоречий необходима покадровая фотография лавины, аналогичная той, что была проведена в [1]. При этом необходимо обеспечить пространственное разрешение на объекте не хуже 0.1 мм и временную выдержку кадра не более 1 нс.

Считаю необходимым выразить свою благодарность А. А. Рухадзе за полезные консультации.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Шелоболин А. В. Физика плазмы, **26**, N 4, 346 (2000).
- [2] Мик Дж. и Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М., ИИЛ, 1960.
- [3] Ретер Г. Электрические лавины и пробой в газах. М., Мир, 1968.
- [4] Allen K. R., Phillips K. Proc. Roy. Soc., **274A**, (1963). Имеется перевод в [3].
- [5] Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. М., Высшая школа, 1978.
- [6] Коорман D. W. and Saum K. A. J. Appl. Phys., **44**, no. 12, 5328 (1973).
- [7] Flegler E., Raether H. Z. Tech. Phys., **16**, 435 (1935).

Поступила в редакцию 29 мая 2000 г.