

ГЕНЕРАЦИЯ АНОМАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ТЕРМАЛИЗАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

А.Г. Орешко

Московский Авиационный Институт, Москва, Россия

Oreshko_Alex@mail.ru

Разряды при атмосферном давлении представляют интерес для создания перспективных источников электромагнитного излучения. С целью исследования физики пробоя, структуры приэлектродной области, а также возможности получения сильных электрических полей при низком значении приложенного напряжения в открытом разряде был выполнен ряд экспериментов. Экспериментально доказан доменный механизм ускорения заряженных частиц в плазме.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1,2] при взаимодействии электрического разряда с металлом и полимером [1] и при взаимодействии лазерного излучения с воздухом [2] экспериментально получены аномальные образования типа шаровой молнии. Однако нельзя считать, что структура таких образований и механизм их генерации являются окончательно выясненными.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Эксперименты проводились на установке ПП-10 [3], состоящей из накопителя (емкостного типа), зарядного устройства, блока запуска и средств диагностики. Амплитудное значение приложенного напряжения составляло 8,3 кВ. Электрическая схема установки аналогична схемам, используемым в плазменных пушках. Схема эксперимента дана на рис. 1.

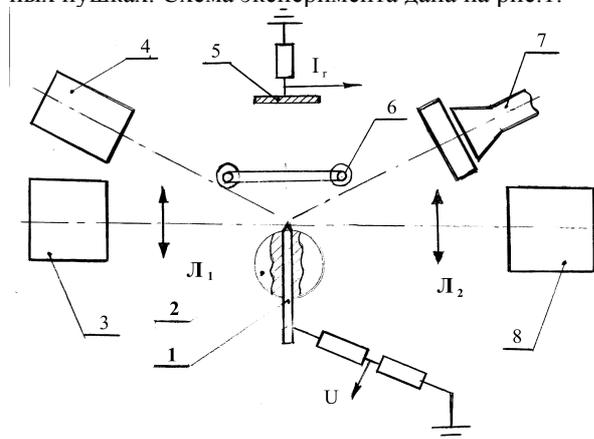


Рис. 1. Схема эксперимента на ПП-10. 1- электрод; 2 – корпус ячейки; 3- электронно-оптическая камера ФЭР-7; 4 – полупроводниковый детектор; 5 – коллектор; 6 – пояс Роговского; 7 – блок регистрации СВЧ-излучения; 8 – электронно-оптический преобразователь; Л - объектив

Электронно-оптическая регистрация свечения осуществлялась в режиме линейной развертки изображения с помощью камеры ФЭР-7. В режиме затворных импульсов использовались двухкаскадные электроннооптические преобразователи ЭП-15 и ПВ-20А с максимумом чувствительности соответственно в зеленой и сине-зеленой части спектра. Время

экспозиции составляло соответственно 5 и 30 наносекунд. Задержка запуска преобразователя относительно начала роста напряжения в начальной стадии разряда осуществлялась с помощью кабельных линий на основе РК-75, в основной стадии - с помощью генератора импульсов ГИ-1. В экспериментах регистрировались: приложенное напряжение, ток в разряде, ток быстрых электронов, спонтанные магнитные поля, порождаемые микропучками быстрых электронов, сверхвысокочастотное (СВЧ) и рентгеновское излучение. Разрядная ячейка состояла из двух электродов. С целью снижения электромагнитных помех все “земли” присоединялись к одной точке, а осциллограммы регистрировались в экранированной комнате со стабилизированным питанием аппаратуры.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При имеющихся параметрах RLC-цепи и нагрузки форма импульса напряжения и тока имеет гармонический затухающий характер. Осциллограммы напряжения и тока в разряде даны на рис. 2. Полярность приложенного напряжения на электродах менялась через каждые полпериода. На осциллограмме тока во время, соответствующее перемене полярности напряжения, имеются полочки. Их существование связано с переходом части электронов в слой избыточного отрицательного заряда [4]. Из-за более высокой подвижности электронов и значительной

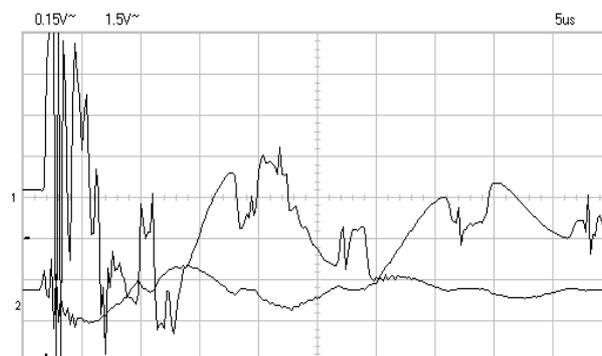


Рис. 2. Осциллограммы: приложенного напряжения – 1 (верхний луч) и тока – 2 (нижний луч) инерционности ионов в переменных полях при смещении группы частиц на расстояние, превышающее

дебаевскую длину экранирования, происходит формирование доменов в приэлектродной области [5]. Осциллограммы СВЧ-излучения ($3 \leq \lambda \leq 6 \text{ см}$) и напряжения даны на рис.3.

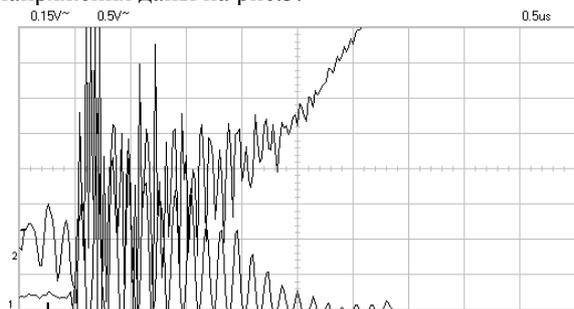


Рис.3. Осциллограммы СВЧ излучения и напряжения в начальный отрезок времени

Сильное поле на домене, превышающее предельное значение для ударной ионизации, приводит к появлению микропучков заряженных частиц, которые способствуют прохождению токоплазменной оболочки в межэлектродном зазоре [6]. В отрезки времени, соответствующие перемене полярности, на осциллограмме напряжения имеются всплески сигнала типа дельта – функции. Величина всплеска составляет 1 кВ. Оценки показывают, что напряженность электрического поля в области домена составляет 10^5 В/см . Полученные с помощью электронно-оптической камеры ФЭР-7 эпограммы свечения для ряда даны на рис.4. Изображения даны для двух экспериментальных серий, выполненных в

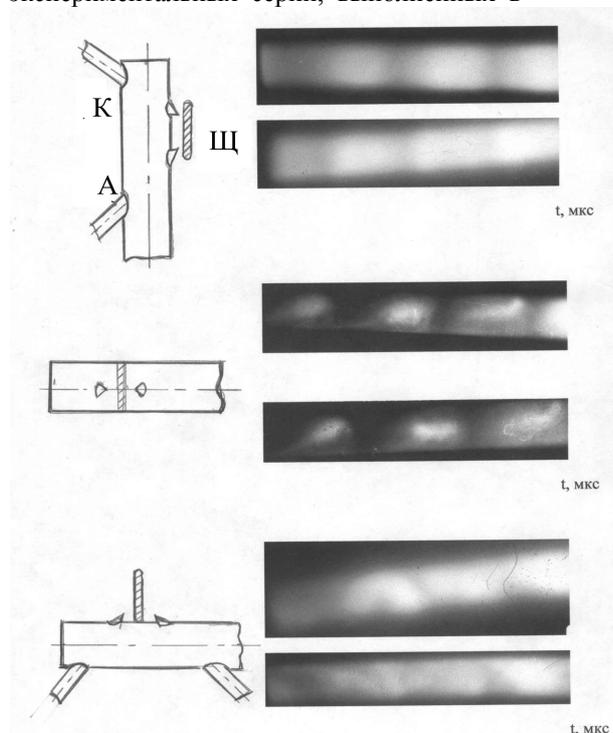


Рис.4. Эпограммы свечения из области разряда для трех положений щели (Щ). Развертка 7,5 мкс/см

разное время при несколько отличающемся расстоянии между электродами. Нечеткость изображения токоплазменной оболочки на рис.4 (в) связана с её движением как в горизонтальной, так и в вертикаль-

ной плоскостях. Следует отметить, что инициирование пробоя никогда не начиналось по поверхности диэлектрика, а всегда происходило около ее.

С помощью электронно-оптического преобразователя с максимумом чувствительности в сине-зеленой части спектра экспериментально обнаружена генерация сферического образования типа “шаровая молния”. Его изображение для четырех отрезков времени дано на рис.5. Распределение интенсивности показывает, что генерируемое образование состоит из более ярко светящейся наружной

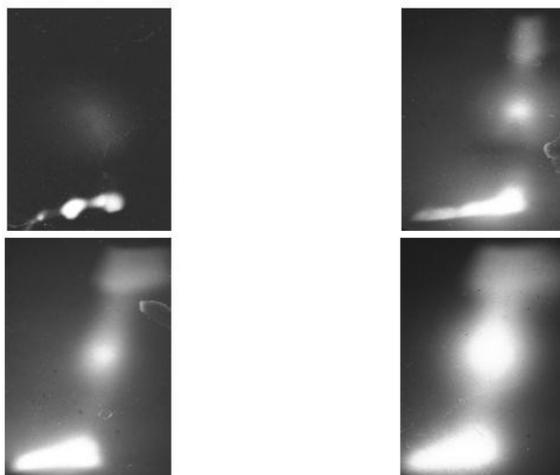
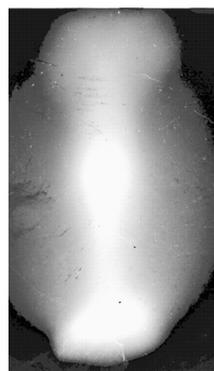


Рис.5. Эпограммы свечения в околоэлектродной области для четырех последовательных отрезков времени. Экспозиция в каждом кадре - 30 нс

(ионной) и менее яркой - внутренней (электронной) оболочек (рис.6). Между оболочками также имеется сильное поле, как и между слоями домена. Образования появляются из-за термализации инжектируемых в околоэлектродное пространство микропучков быстрых электронов. При торможении быстрых



электронов в воздухе происходит передача энергии среде. При некотором значении энергии электрона сечение ионизации имеет экстремальный характер. Быстрые электроны генериру-

ются в области приэлектродного домена и ускоряются перпендикулярно оси разряда с помощью генерируемых при разделении поперечных электромагнитных

волн [5,6]. Энергия быстрых электронов значительно превышает энергию, соответствующую значению приложенного напряжения. Сильное поле в области сферического образования, превышающее предельное значение для

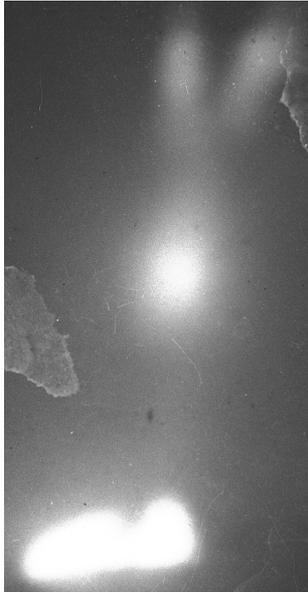


Рис.7. также изображения при-
электродного домена, инжектирующего быстрые электроны (см. рис.5,а). Известен ряд реально работающих механизмов ускорения заряженных частиц в плазме [7,8]. Сильные поля и волны, способные ускорять частицы, появляются также при разделении зарядов [5].

4. ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Генерация быстрых электронов в разряде происходит следующим образом. В начальный момент времени высокие значения скорости изменения приложенного к промежутку напряжения dU_{ap}/dt и, соответственно - напряженности электрического поля, приводят в приэлектродной области к смещению группы частиц одного сорта относительно группы частиц другого сорта. Неравенство потоков направленного дрейфа электронов и ионов в элементе объема приводит к появлению в области разделения зарядов индуцируемого сильного электрического поля [5]

$$\frac{dE_{ind}}{dt} = \frac{4\pi eE}{\varepsilon} (n_e \mu_e(E) - n_i \mu_i) \quad (1)$$

Системе кулоновски взаимодействующих частиц энергетически выгодно иметь сильное поле в узкой приэлектродной области и слабое в остальной части, чем поле с некоторым значением напряженности в межэлектродном зазоре. При смещении группы частиц на расстояние, превышающее λ_D , появляется электрический домен. Характерное время разделения зарядов определяется максвелловским временем релаксации пространственного заряда. Оно пропорционально величине, обратной ленгмюровской или уточненной частоте волн пространственного заряда [6], учитывающей конечную проводимость плазмы

$$\omega_{wsc} = \omega_{pe} - \frac{\omega_{pe}^2}{12\pi\sigma_d} i, \quad (2)$$

в которой: ω_{pe} - ленгмюровская частота; σ_d - дифференциальная проводимость. Высокие значения "тока смещения" при разделении зарядов приводят к генерации поперечной электромагнитной волны. Дисперсионное уравнение для таких волн дается в виде [6]

$$\omega_{shf}^2 = k^2 c^2 + \left(\omega_{pe} - \frac{\omega_{pe}^2}{12\pi\sigma_d} i \right)^2, \quad (3)$$

в котором: k - волновой вектор; c - скорость света. В результате непрерывного взаимодействия волн с частицами последние набирают энергию, которая значительно превышает значение, соответствующее приложенному напряжению. Уравнение движения для ускоряемых с помощью электромагнитных волн заряженных частиц имеет вид [9]

$$\frac{d(m_a u_a)}{dt} = q_a \left(\vec{E}_y + \frac{u_a \times B_z}{c} \right), \quad (4)$$

в котором: $E_y = E_0 e^{i(\omega + ky)}$; $B_z = B_0 e^{i(\omega + kz)}$.

Основной результат данной работы заключается в экспериментальном доказательстве ранее теоретически обоснованного автором доменного механизма ускорения заряженных частиц в плазме. Отметим, что высокая концентрация среды не позволила зарегистрировать быстрые ионы из-за малости их пробега в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.Е. Емелин, В.С. Семенов, В.Л. Бычков, Н.К. Белишева, А.П. Ковшик // *Журнал технической физики*. 1997. т.67, N3, с.19-28.
2. В.А. Скворцов, Н.И. Фогель // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2002. т.7, N7, с.63-74.
3. А.Г. Орешко // *Тезисы докладов XXX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС*. Москва. 2003, с.164.
4. А.Г. Орешко // *Физика плазмы*. 1991. т.17, N6, с.679-685.
5. А.Г. Орешко // *Доклады Академии Наук*. 2001, т.376, N2, с.183-185.
6. А.Г. Орешко // *XI Конференция по физике газового разряда. Тезисы докладов*. Рязань, 2002, Часть 1, с.50-51.
7. Ya.B. Fainberg // *Plasma Physics Reports*. 1994, vol.20, p.549.
8. V.I. Karas', V.A. Balakirev, Ya.B. Fainberg, G.V. Sotnikov, I.V. Karas', V.D. Levchenko // *Problems of Atomic Science and Technology. Issue: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*. 2000, vol.1 (2), p. 122-125.
9. Н.Кролл, А.Трайвелпис. *Основы физики плазмы*. М.: Мир, 1975, с.528.