

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванченко А. И., Крашенинников В. В., Пономаренко А. Г., Шепеленко А. А. Быстропроточные CO₂-лазеры непрерывного действия ЛОК-3 и ЛОК-3М // Применение лазеров в народном хозяйстве: Всесоюз. конф.— М., 1985.
2. Armandillo E., Kaye A. S. Modelling of transverse-flow cw CO₂ lasers: theory and experiment // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1980.— V. 13, N 2.
3. Wu K. H. Influence of aerodynamic and electrical-discharge homogeneity on a transversely excited cw CO₂ laser // Opt. Commun.— 1987.— V. 64, N 1.
4. Герасимов В. Р., Мошин Ю. Н. Численный расчет влияния неоднородностей активной газовой среды в быстропроточном газоразрядном CO₂-лазере со смещением на расходимость излучения.— М., 1982.— (Препр./ИАЭ; № 3545—12).
5. Гадияк Г. В., Добровский А. Л., Насыров К. А. Оптимизация проточных лазеров при численном моделировании // Мощные CO₂-лазеры для плазменных экспериментов и технологии.— Новосибирск, 1988.— (Препр./ИТПМ СО АН СССР; № 24—88).
6. Гадияк Г. В., Насыров К. А. Численное моделирование газоразрядных проточных лазеров.— Новосибирск, 1986.— (Препр./ИТПМ СО АН СССР, № 2).
7. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики.— М.: Наука, 1976.
8. Котеров В. Н., Пригарин В. Е. К расчету динамических равновесных состояний газового потока при объемном импульсном теплоподводе // ЖВММФ.— 1985.— Т. 25, № 11.
9. Яушев И. К., Хахимзянов Г. С. О численном расчете стационарных плоскопараллельных течений идеальной жидкости и газа в каналах сложной конфигурации // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1977.— № 13, вып. 3.
10. Хахимзянов Г. С., Яушев И. К. О расчете давления в двумерных стационарных задачах динамики идеальной жидкости // ЖВММФ.— 1984.— Т. 24, № 10.

г. Новосибирск

Поступила 5/VII 1988 г.,
в окончательном варианте — 11/XI 1988 г.

УДК 533.09+551.594

Е. А. Зобов, А. Н. Сидоров

ЧЕТОЧНАЯ СТРУКТУРА РАЗРЯДА ПРИ ПРОБОЕ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

Явление, описываемое в литературе как четочная молния, представляет собой прерывистое свечение, которое остается вдоль траектории обычной линейной молнии на время от нескольких десятых долей секунды до 2 с [1]. Канал разряда линейной молнии как бы распадается на отдельные светящиеся области-четки таким образом, что свечение одних участков длится дольше, чем свечение других. Размеры четок оцениваются от нескольких сантиметров до нескольких метров [1, 2]. Размер темного промежутка может составлять несколько диаметров светлого участка.

От обычной линейной молнии четочная отличается следующими особенностями: главная — это ее «пунктирность»; во многих случаях ее прерывающаяся линия имеет синусоидальную форму, но не всегда; ее след не ветвится. Количество сообщений, опубликованных фотографий и обсуждений, касающихся четочной молнии, существенно меньше числа работ, посвященных другому аномальному явлению — шаровой молнии. Чаще всего изображение четочной молнии получается на снимках, сделанных с помощью простых камер в режиме «ожидания». При этом наблюдатель либо отсутствовал, либо глазом четочную молнию не различал.

Разряды со структурой типа четочной молнии получены с помощью системы индукционных катушек [1]. Причем явление четочной молнии не было замечено экспериментаторами, а обнаружено на киноплёнке после окончания экспериментов. Четочная структура представляла собой остаток канала высоковольтного разряда и существовала около 0,16 с.

Представлялось интересным найти условия для наблюдения явлений, подобных четочной молнии, в таком разряде с резконеоднородным полем, как скользящая искра (СИ), так как процессы формирования пробоя в СИ и молнии сходны. Фоторазвертки разряда молнии и СИ имеют продольную неоднородность по свечению как на стадии пробоя, так и на стадии



Р и с. 1

спада тока и послесвечения. Это и послужило исходной предпосылкой для поиска в СИ явлений, подобных четочной молнии.

В данной работе исследовались СИ в воздухе при атмосферном давлении как управляемые, так и неуправляемые. Метод управления и техника эксперимента изложены в [3]. Съемка производилась фоторегистратором СФР-2М. В режиме фоторазвертки изучались только управляемые СИ. Замена входного объектива СФР-2М на более светосильный, а также меры по повышению светочувствительности фотопленки позволили увеличить чувствительность фоторегистрации примерно на порядок.

Четочная структура (ЧС) в незавершенной стадии СИ была неоднократно зарегистрирована в режиме лупы времени в неуправляемых разрядах. На рис. 1 приведены кадры из кинограмм с ЧС.

Если к разрядному промежутку приложено косинусоидальное знакопеременное напряжение с отрицательным первым полупериодом, на поверхности диэлектрика в незавершенных СИ наблюдается ЧС в виде ряда светящихся точек длиной 1—4 мм, разделенных темными промежутками длиной 3—20 мм. Наиболее характерная длина темных промежутков составляет 10—15 мм. Четки связывает слабосветящаяся нить. Со временем длина четок увеличивается, а нить становится ярче. Длительность свечения четок не превышает 10 мкс.

Все приведенные кинограммы выполнены при длине разрядного промежутка 85 см. Толщина диэлектрика (полиэтилентерефталат) 0,1 см. Пробное напряжение промежутка 80 кВ. Амплитудное значение напряжения для рис. 1 70 кВ, для рис. 2 80 кВ, для остальных 85 кВ. Амплитудное значение тока для рис. 1 100 А, для рис. 2,3 2 кА. Импульс напряжения получался на вторичной обмотке кабельного трансформатора с коэффициентом трансформации 6. Емкость конденсатора в первичной цепи 6 мкФ. Период косинусоиды 10 мкс. Кинограмма (рис. 4) выполнена при введенной в цепь заземленного электрода переменной индуктивности с ферритовым сердечником. Первый полупериод косинусоидального знакопеременного напряжения отрицательный. При положительном первом полупериоде косинусоиды ЧС в незавершенной стадии разряда зарегистрировать не удалось.

Продольная неоднородность по свечению на фоторазвертке управляемой СИ, которая в наших условиях является устойчивой закономерностью независимо от знака подаваемого напряжения, до момента пробоя имеет вид узких темных полос шириной 1—4 мм, чередующихся, как правило, через 10—15 мм (рис. 2). После завершения сильноточной стадии время свечения отдельных участков в некоторых развертках на порядок превышает время свечения соседних участков. Участки более длительного послесвечения часто связаны с темными полосами, возникающими на стадии пробоя.

Сопоставление фоторазвертки процесса пробоя, кинограмм с ЧС, а также механизма пробоя в длинной искре при отрицательных импульсах

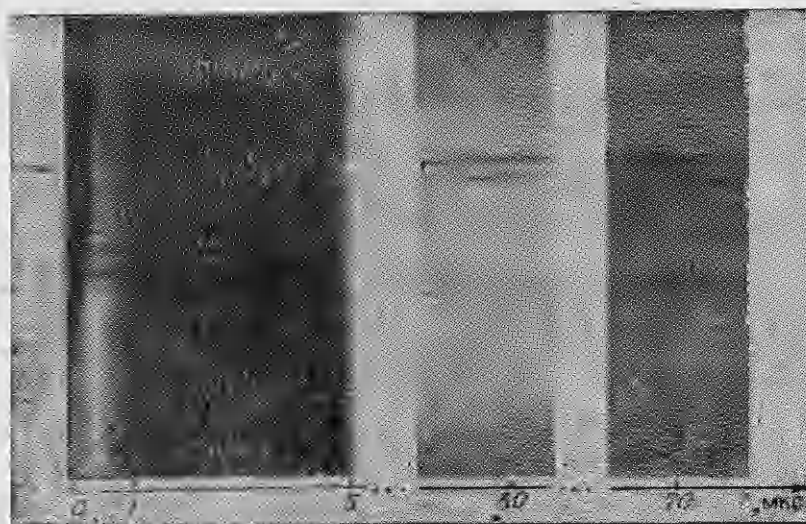


Рис. 2

напряжения [4] позволяет сделать следующее предположение о механизме образования ЧС на незавершенной стадии разряда. Процесс пробоя происходит с образованием первичного и вторичного анодонаправленных стримеров и катодонаправленного, т. е. встречного, стримера. Причина образования встречного стримера — объемный положительный заряд, образующийся в процессе разделения зарядов, который начинается, вероятно, уже на быстрых, волновых, стадиях пробоя [5].

Временное разрешение СФР-2М недостаточно для наблюдения начальных стадий пробоя, но иногда, когда приложенное напряжение примерно равно пробойному для данного разрядного промежутка и процесс пробоя на отдельных участках его замедлен, наблюдается процесс, который можно интерпретировать как встречный стример. На фоторазвертке (рис. 2) интервал времени 0—1 мкс — стадия пробоя, 5 мкс — начало сильноточной стадии, 30 мкс — спад тока, время протекания тока ~ 40 мкс, 70 мкс — послесвечение. Фоторазвертка выполнена на участке длиной 38 см, прилегающем к высоковольтному электроду. Зона свечения, имеющая обратный угол наклона, обозначена стрелкой. Таким образом, процесс пробоя при перенапряжении у высоковольтного электрода выглядит во времени как возникновение светлых точек, свечение которых через 0,01—0,1 мкс распространяется в обе стороны. При остановке или замедлении процесса пробоя величина объемного заряда недостаточна для образования встречного стримера, процесс пробоя прекращается, нейтрализация зон концентрации объемного положительного заряда происходит

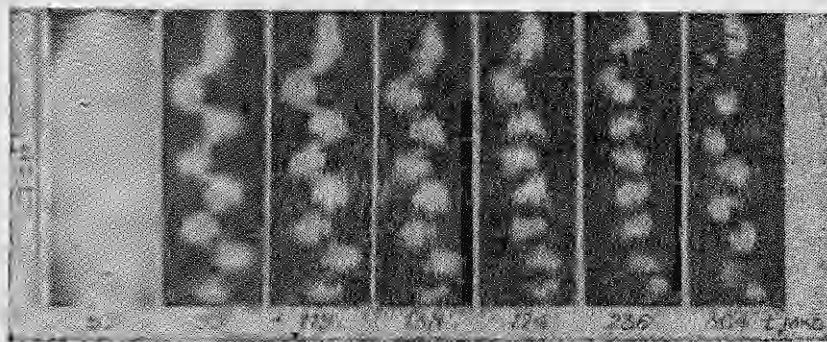


Рис. 3

существенно медленнее, чем при движении фронта пробоя, что и дает возможность наблюдать ЧС на кинограмме разряда.

При пробое положительными импульсами напряжения также образуются зоны концентрации заряда противоположного знака, т. е. точки концентрации электронных лавин и первичных стримеров (стебель и узлы короны [6]), однако процесс нейтрализации заряда происходит без рекомбинационного излучения, поэтому ЧС в этом случае зарегистрировать не удалось.

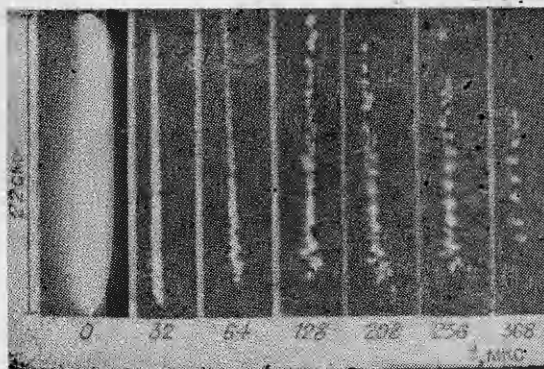
Таким образом, образование ЧС имеет место при замедлении или остановке процесса поступательного развития пробоя в данном канале или боковой ветви его. Кроме того, можно утверждать, что кинограммы рис. 1 отражают не процесс развития пробоя, а послесвечение этого процесса, т. е. процесс рекомбинации образованного на стадии пробоя объемного положительного заряда.

При анализе фотографий четочной молнии было обнаружено, что светящиеся четки остаются невозмущенными и устойчивыми даже при близких последующих разрядах [1]. Это свидетельствует о том, что четки не являются результатом протекания тока в канале четочной молнии, так как такой ток должен претерпевать возмущение под действием тока соседнего разряда. Этот факт согласуется с выводом о возникновении ЧС в незавершенной СИ при остановке в развитии процесса пробоя. Полное отсутствие тока после образования ЧС маловероятно из-за нейтрализации избыточного заряда четок, о чем говорит связывающая четки слабосветящаяся нить, однако этот ток должен быть существенно меньше тока от движущегося фронта пробоя.

Если принять ЧС как нереализованное направление пробоя, а образование четок — как необходимую стадию пробоя длинных разрядных промежутков в реализованном направлении пробоя, можно объяснить появление темных полос на фоторазвертках СИ. Локальные зоны концентрации заряда (четки), вероятно, имеют более низкое сопротивление по сравнению со средним сопротивлением канала разряда. При переходе к сквозной фазе протекания тока на данном участке, т. е. за фронтом пробоя, выделение энергии в канале пропорционально сопротивлению участка канала. На участке с меньшим сопротивлением выделяется меньше энергии, излучение этого участка слабее, поэтому возникают темные полосы, соответствующие зонам концентрации заряда. Боковые ветви на фоторазвертках СИ, как правило, примыкают к темным полосам. Аналогично в молнии интенсивность излучения резко уменьшается в точках ветвления [7].

Время жизни ЧС порядка 10 мкс, полученное в незавершенной СИ, существенно уступает времени жизни четочной молнии, существующей до 2 с. С целью получения ЧС со временем жизни порядка 1 мс были предприняты попытки получения ее в завершенной стадии СИ. При этом исходили из следующих фактов.

Четочная структура зарегистрирована также при искусственном стимулировании молнии заземленной проволокой, которую тянула за собой ракета [1]. Было замечено, что канал молнии в первые моменты времени прямолинеен, но в дальнейшем приобретает извилистую форму. При этом наиболее яркие четки появляются в местах максимального сжатия канала. Это отвечает предположению [7] о взаимосвязи четок с местами деформации канала. Также известно [2, 8], что в канале разряда молнии после



Р и с. 4

окончания протекания тока имеются локальные области с устойчивым свечением, длительность которого примерно на порядок превосходит длительность свечения основного канала. Такое явление часто возникает на изгибах канала [2]. При моделировании этого эффекта в управляемой СИ, где наперед задавалась форма канала, каждому его изгибу соответствует одна зона более длительного свечения, причем зоны, расположенные вначале зигзагообразно, подобно рисунку Теплера, воспроизведенному в [1], через 200—250 мкс вытягиваются в прямую линию аналогично четочной молнии (см. рис. 3).

Исследование извилистости каналов молнии [7] показывает, что среднее абсолютное изменение направления приблизительно постоянно от вспышки к вспышке и составляет 16° . Для СИ оно $5-10^\circ$ у высоковольтного электрода и до 45° у заземленного при напряжении, примерно равном пробойному. При перенапряжении извилистость существенно уменьшается. Так как наиболее вероятная причина извилистости канала молнии — радиальная составляющая напряженности электрического поля, извилистость канала разряда должна увеличиваться у противоположного электрода как в СИ, так и в молнии, где относительное значение радиальной составляющей напряженности поля возрастает. Исходя из этого, можно сформулировать предпосылки для появления четочной молнии по аналогии с ЧС скользящего разряда.

Четочная молния может возникать в завершенной и в незавершенной стадии разряда. Вероятно, к незавершенной стадии можно отнести те фотографии в [1], которые получены, когда наблюдатель не видел четочной молнии. В этом случае условием возникновения четочной молнии на участке разрядного промежутка является ограниченное воздействие пробойной напряженности поля, достаточное для образования локальных зон объемного заряда, но недостаточное для формирования хорошо проводящего канала. Это условие может выполняться как на боковой ветви, т. е. альтернативной траектории разряда, так и на фронте пробоя, если напряженность поля недостаточна для формирования сквозного проводящего канала.

Для возникновения четочной молнии в завершенной стадии необходимо, чтобы пробой происходил при напряжении, примерно равном пробойному, т. е. выполнялось условие максимальной извилистости канала, по крайней мере у земли. Второе условие — небольшая энергия разряда, достаточная для образования локальных областей более длительного свечения, но недостаточная для образования канала с большим током разряда. Это условие в основном является условием для наблюдения четочной молнии невооруженным глазом, поскольку продольную неоднородность при пробое в неоднородном поле можно зарегистрировать практически всегда.

Резконеоднородные поля с большими градиентами потенциала могут возникнуть в том случае, если навстречу отрицательному лидеру от земли поднимается встречный положительный лидер [7]. При моделировании этих условий в СИ возможно образование ЧС даже и на прямолинейном участке канала (см. рис. 4). Вероятно, эти же условия возникают и при искусственном стимулировании молнии [1]. Получение ЧС возможно здесь на ограниченном участке канала, в зоне взаимодействия двух лидеров, при уже упоминавшемся условии ограничения по энергии.

Для каких-либо количественных оценок такого явления необходимо знать причины аномально длительного времени жизни плазменных образований. Наиболее вероятная причина — неидеальность плазмы в зонах локальной концентрации заряда [9]. Интенсивность излучения неидеальной плазмы понижена вследствие нереализации части верхних уровней и снижения потенциала ионизации [10]. По этой же причине распад неидеальной плазмы может происходить заметно медленнее [11], чем, по-видимому, и объясняется появление темных полос на фоторазвертках СИ (см. рис. 2).

Регистрация ЧС позволяет рассматривать процесс пробоя длинного разрядного промежутка несколько под иным углом зрения: не как движение стримера, переносящего заряд, а как создание в результате действия пробойных волн [5] и коронных процессов [6] цепочки локальных зарядов, которые создаются по всей зоне ионизации на фронте пробоя. Поочередное включение локальных зарядов в проводящий канал лидера при фоторегистрации выглядит как его ступенчатое распространение. Локальные заряды на реализованной траектории лидера компенсируются за времена порядка $1 \cdot 10^{-8}$ с, при остановке фронта пробоя либо на альтернативных траекториях лидера такой компенсации не происходит. Здесь локальные заряды распадаются с излучательной рекомбинацией, благодаря которой становится возможной регистрация ЧС в незавершенной стадии как в СИ, так и в молнии.

В изгибах канала разряда (см. рис. 3) зона ионизации увеличивается, образующиеся локальные заряды здесь также не компенсируются в сильноточной стадии. По-видимому, наоборот, есть возможность их дальнейшего формирования и роста, особенно в распадающейся плазме сильноточного разряда. Вопросы локализации заряда, строения локальных зарядов и времени рекомбинации пока неясны и требуют дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. — М.: Мир, 1983.
2. Сингер С. Природа шаровой молнии. — М.: Мир, 1973.
3. Андреев С. И., Зобов Е. А., Сидоров А. Н. Метод управления развитием и формированием систем параллельных каналов скользящих искр в воздухе при атмосферном давлении // ПМТФ. — 1976. — № 3.
4. Горин Б. Н., Шкилев А. В. Развитие электрического разряда в длинных промежутках стержень — плоскость при отрицательном импульсном напряжении // Электричество. — 1974. — № 10.
5. Асиновский Э. И., Василяк Л. М., Марковец В. В. и др. Волновой пробой газовых промежутков. 1. Быстрые стадии пробоя // ТВТ. — 1983. — № 2.
6. Стекольников И. С. Природа длинной искры. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
7. Юман М. Молния. — М.: Мир, 1960.
8. Мик Дж., Крэгг Дж. Электрический пробой в газах. — М.: ИЛ, 1960.
9. Фортв В. Е., Якубов И. Т. Физики неидеальной плазмы. — Черноголовка: ИВТАН СССР, 1984.
10. Кобзев Г. А., Куриленков Ю. К., Норман Г. Э. К теории оптических свойств неидеальной плазмы // ТВТ. — 1977. — № 2.
11. Куриленков Ю. К. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы // ТВТ. — 1980. — № 2.

г. Ленинград

Поступила 4/IV 1988 г.,
в окончательном варианте — 30/VIII 1988 г.

УДК 537.311:537,8

Ю. П. Емец, Ю. В. Обнос

ТОЧНО РАЗРЕШИМАЯ ЗАДАЧА О ВЗАИМНОМ ВЛИЯНИИ ВКЛЮЧЕНИЙ В ТЕОРИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

1. Введение. Один из принципиальных вопросов теории дисперсных смесей при исследовании физических полей состоит в корректном учете влияния включений друг на друга. В реальных гетерогенных средах эта проблема осложняется различием форм и размеров включений, разнообразием образуемых ими структур, отличием свойств материалов составных компонентов и несущей фазы. В совокупности всего многообразия действующих факторов расчеты полей в неоднородных средах практически неосуществимы, и для упрощения вычислений необходимо принимать ряд допущений. Если, например, характерные размеры включений малы и не очень сильно отличаются друг от друга, то обычно делается предположение, что все элементы дисперсной фазы одинаковы и имеют правильную форму в виде шаров, эллипсоидов или цилиндров. Как известно, поле в отдельно взятых таких телах однородно, когда они помещены в однородное внешнее поле. Это свойство используется при изучении гетерогенных сред с малой концентрацией включений. Если, кроме того, характеристики материала включений изменяются в узких пределах, то все они могут считаться однотипными.