

Самоорганизация анодных и катодных токовых пятен в газовом разряде

Исламов Рафаэл Шайхиевич

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН

ВСТУПЛЕНИЕ

Газоразрядные эффекты отличаются необычным разнообразием, сложностью и запутанностью. Особенно много неясностей связано с явлениями в приэлектродных областях, ухудшающими однородность и стабильность горения разряда, а в ряде случаев препятствующими достижению технологически оптимального уровня энерговыклада из-за формирования токовых структур и контракции разряда с разрушением электродной системы. Исключительно важна роль приэлектродных явлений и при рассмотрении вопросов масштабируемости газоразрядных систем.

Следует отметить, что физика газового разряда до сих пор, несмотря на качественный прорыв в применение аналитических и численных методов в связи с существенным ростом вычислительных возможностей, остается преимущественно экспериментальной наукой. В частности, многочисленные экспериментальные наблюдения по формированию и самоорганизации токовых пятен на электродах оказались весьма сложными для теоретического осмысления.

Одна из проблем, как было выявлено из анализа качественных и количественных различий в имевшихся численных результатах, состояла в том, что изучаемые явления оказались чувствительны к выбору численной реализации математической модели: диффузия электронов и ионов в разряде, играющая важную роль, количественно оказывалась заметно меньше, чем “счетная” диффузия. В связи с этим в ИПЛИТ РАН была исследована и впервые доказана корректность математической постановки диффузионно-дрейфового приближения, широко используемой в теории газового разряда. Кроме того, был разработан соответствующий вычислительный алгоритм и была доказана его корректность (т. е., что он дает решение данной математической модели). Заметим также, что разработанный численный алгоритм существенно сократил время счета по сравнению с известными методами, также учитывающими приэлектродные явления.

Применение современных аналитических методов к диффузионно-дрейфовой модели газового разряда позволило впервые разработать замкнутую аналитическую модель процессов самоорганизации анодных токовых пятен в тлеющем разряде, не использующую какие-либо дополнительные данные или постулаты. Предложенная модель вписывается в общую концепцию активных сред с диффузией в синергетике, в рамках которой образование упорядоченных анодных токовых структур оказалось следствием неустойчивости тьюринговского типа в бистабильной системе с S-образной вольт-амперной характеристикой.

Развитые модели позволили впервые обосновать ряд экспериментально известных наблюдений (включая первичность зарождения неустойчивости на аноде, беспороговый характер возникновения структур при первоначально однородном распределении тока, процессы вторичной перестройки структур, эффект нормальной плотности тока на аноде, существование критических значений величин распределенного сопротивления анодной оксидной пленки и характеристической энергии электронов, при превышении которых происходит полное подавление анодных токовых пятен), а также получить новые результаты (включая аналитическую зависимость периода токовых структур от условий и свойств среды).

Часть результатов была получена с участием сотрудников ИПЛИТ РАН Гуламова Э.Н. и Забелина А.М.

АННОТАЦИЯ

В ИПЛИТ РАН выполнен цикл фундаментальных теоретических исследований самоорганизации анодных и катодных токовых пятен в газовом разряде. Проведены взаимодополняющие численные и аналитические исследования закономерностей возникновения, развития и кооперативного поведения электродинамических токовых неустойчивостей тлеющего разряда повышенного давления. Основные приоритетные результаты ИПЛИТ РАН по исследованию механизмов самоорганизации приэлектродных токовых структур в тлеющем газовом разряде состоят в следующем.

- Разработан математически обоснованный вычислительный алгоритм для исследования нестационарных газоразрядных процессов в двумерной геометрии. Результаты его применения в осесимметричной и плоской геометриях обосновывают достаточность только электродинамических явлений (диффузии и дрейфа заряженных частиц, нарушения квазинейтральности, ионизации и рекомбинации) для проявления процессов самоорганизации упорядоченных токовых структур в самостоятельном тлеющем разряде повышенного давления. Численно в рамках чисто электродинамических явлений показано, что при характерных значениях произведения давления на размер разрядного промежутка в несколько десятков см·Торр неустойчивость в слаботочном тлеющем разряде зарождается в анодной области, на которую впоследствии по достижению возмущения катодной области накладывается процесс скоротечного образования катодного пятна с локализацией тока во всем разрядном промежутке. Установлено существование критического значения величины распределенного сопротивления анодной оксидной пленки, при превышении которой происходит полное подавление анодных токовых пятен.

- Разработана замкнутая аналитическая модель процессов самоорганизации анодных токовых пятен в тлеющем разряде, не использующая какие-либо дополнительные данные или постулаты и асимптотически эквивалентная диффузионно-дрейфовой модели газового разряда. Предложенная модель вписывается в общую концепцию активных сред с диффузией в синергетике и позволяет описывать процессы самоорганизации токовых структур в анодном слое в рамках понятий "активатора" (плотность тока) и "ингибитора" (анодное падение потенциала). Показано, что образование упорядоченных пространственных токовых структур можно рассматривать как следствие неустойчивости тьюринговского типа в бистабильной системе с S-образной вольт-амперной характеристикой. Получены критические условия существования и основные характеристики токовых структур в зависимости от условий и свойств среды.

- Теоретически (численно и на основе аналитической модели) в рамках чисто электродинамических явлений воспроизведено экспериментально известное явление самоорганизации сложных токовых структур в самостоятельном тлеющем разряде повышенного давления, включая беспороговый характер возникновения структур при первоначально однородном распределении тока, процессы вторичной перестройки структур и эффект нормальной плотности тока на аноде. Установлено существование критического значения величины характеристической энергии электронов, зависящего от плотности тока, при превышении которого спонтанное образование анодных токовых пятен становится невозможным.

Результаты исследований опубликованы в журналах «ЖТФ», «Физика плазмы», «ПМТФ», «J. Appl. Phys. D», «Известия РАН: Механика жидкости и газа», «J. Appl. Phys.», «IEEE Tr. on Plasma Science.», «Phys. Rev. E», «Дифференциальные уравнения», «ЖВММФ», «Известия РАН: сер. Физическая», «Proceedings SPIE».

ВВЕДЕНИЕ

Анодные пятна, часто проявляющие себя в виде ярких и красочных образований и описанные еще в начале прошлого века (Lehmann O., 1902), до сих пор нельзя отнести к кругу явлений, достаточно изученных и понятных. Сложные коллективные явления, в частности самоорганизация токовых пятен в образования с ярко выраженной симметрией, многократно экспериментально описывались на протяжении всего прошлого века (см., например, обзор Emeleus K.G., 1982), но в теоретическом плане исследованы слабо. Анодные и катодные пятна обычно имеют круглую форму. Наличие поперечной прокачки газа, характерное для многих технических приложений, в ряде случаев приводит к изменению геометрии токовых структур. Например, в поперечном тлеющем разряде повышенного давления при ламинарном режиме течения газа может наблюдаться расслоение анодного свечения на вытянутые вдоль потока газа слои. Токовые неустойчивости в мощных CO_2 -лазерах приводят к тому, что поверхность анода покрывается оксидной пленкой (АОП), периодичной поперек потока в соответствии с видимой картиной свечения.

Исследования стабильности разряда и условий однородного горения разряда имеют **практический интерес** для ряда приложений. Получение газоразрядной плазмы с технологически оптимальными параметрами в заданной геометрии часто наталкивается на определенные ограничения. На практике наиболее актуальными являются проблема получения устойчивой однородной плазмы при повышенных давлениях, а также вопросы масштабируемости газоразрядных систем. Одна из основных причин нарушения однородности связана с тем, что в газовом разряде режим равномерного распределения плотности тока по поперечному сечению часто оказывается неустойчивым и происходит формирование токовых структур, нередко завершающаяся контракцией разряда. Газовый разряд можно рассматривать как открытую систему, значительно удаленную от термодинамического равновесия. Благодаря нелинейному характеру процессов и наличию приэлектродных слоев в такой системе проявляется множество неустойчивых состояний и происходит самоорганизация разнообразных диссипативных структур. Эти процессы определяются некоторыми критическими значениями управляющих параметров, зависящими от свойств среды. Развитие неустойчивостей может качественно изменить структуру разряда и приводить к контракции с разрушением электродной системы. Исследования в данном направлении стимулируются появлением ряда новых технологий, использующих газовый разряд (газоразрядные лазеры, плазменные панели, плазмохимические реакторы и т. п.), и качественным ростом математических и технических возможностей для проведения численных и аналитических исследований ранее не решенных проблем.

Несмотря на наличие обширного экспериментального материала по исследованию токовых пятен, **результаты теоретического осмысления проблемы возникновения и самоорганизации токовых структур, предшествующие полученным в ИПЛИТ РАН и представленным в настоящем разделе новым результатам**, изложены в сравнительно ограниченном числе публикаций. В обзоре *Напартовича А.П. и Старостина А.Н.* “Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления” (Химия плазмы. М.: Атомиздат, 1979, вып. 6) отмечается, что “вопрос о влиянии приэлектродных явлений на устойчивость всего разряда по существу остается открытым”.

Давно известна одна из основных особенностей поперечной структуры нормального тлеющего разряда, состоящая в том, что ток на электродах занимает определенную площадь, пропорциональную его величине. Постулат о реализации в нормальном тлеющем разряде минимально возможного катодного падения [Энгель А., Штенбек М. “Физика и техника электрического разряда в газах” (М.-Л.: ОНТИ, 1936. Т. 2)] оказался плодотворным для объяснения этого и ряда других экспериментальных фактов, но вопрос о механизме установления нормальной плотности тока на электродах (см. обсуждение в монографиях [Энгель А. “Ионизованные газы” (М.: Физматгиз, 1959);

Райзер Ю.П. “Физика газового разряда” (М.: Наука, 1992)) еще, по-видимому, трудно отнести к окончательно решенным. В анодной области эксперименты и численные расчеты показывают монотонно падающую вольт-амперную характеристику и подходы на основе “принципа минимума мощности” не продуктивны для объяснения процессов формирования анодных токовых пятен.

Численно в нестационарной пространственно-двумерной постановке в рамках чисто электродинамических явлений возможность развития анодных и катодных токовых пятен в тлеющем разряде была продемонстрирована в пионерских работах *Гладуша Г.Г. и Самохина А.А.* [ПМТФ, 1981, № 5; Физика плазмы, 1985, т. 11(2)], а также *Напартовичем А.П., Таран М.Д. и др.* [Физика плазмы, 1982, т. 8(4); 1987, т. 13(9)]. Численные исследования *Райзера Ю.П. и Суржикова С.Т.* [ТВТ, 1988, т. 26(3); 1990, т. 28(3)] стационарных состояний разряда выявили существенное влияние “счетной” диффузии на характеристики катодных и анодных токовых пятен. Этот результат прояснил причину существенных количественных и даже качественных расхождений в имевшихся расчетных результатах и обозначил необходимость построения численных моделей газового разряда второго (или выше) порядка аппроксимации по пространственным координатам.

Теории анодной области тлеющего разряда развивались (на основе весьма различающихся предпосылок) в основном для области низких давлений. Модель положительного падения потенциала в области интересующих нас токов и повышенных давлений ($p \approx 10\text{--}400$ Торр), когда диффузионный слой и длина установления функции распределения электронов малы и толщина анодного слоя определяется нарушением квазинейтральности, впервые была предложена *Пашкиным С.В.* [ТВТ, 1976, т. 14(3)]. Для характерного масштаба анодной области D_a и величины анодного падения потенциала U_a в азоте получены следующие оценки: $D_a \approx 10^{-2}$ см, $U_a \approx 10$ В. В последующем эта теория последовательно уточнялась за счет выбора более реалистических аппроксимаций кинетических коэффициентов плазмы. Во всех случаях получена падающая ВАХ анодного слоя, характерная для экспериментов в рассматриваемых условиях.

Большинство теоретических исследований токовых картин на электродах (см., например, *Radehaus C., et al* [Phys. Lett. A, 1987, v. 125(2,3)]; *Muller K.G.* [Phys. Rev. A, 1988, v. 37(12)]; *Krischer K. and Mikhailov A.* [Phys. Rev. Lett., 1994, v. 73(23)]; *Astrov Yu.A. and Logvin Yu.A.* [Phys. Rev. Lett., 1997, v. 79(16)]) основаны на чисто феноменологических уравнениях для распределения плотности тока по поверхности электрода. Другое описание формирования токовых картин было развито на физической основе для малых отклонений от первоначально поперечно-однородного состояния с использованием экспериментальных или численных S-образных вольт-амперных характеристик (*Radehaus C., et al*, [Phys. Rev. A, 1990, v. 42(12); *Benilov M.S.* [Phys. Rev. A, 1992, v. 45(8)]). Эти подходы позволили получить ряд интересных статических и динамических картин самоорганизации одиночных и регулярных токовых структур и воспроизвести многие картины и сценарии, наблюдаемые в *dc* и *ac* системах с протяженными поперечными размерами. Многие феноменологические аспекты однородного горения тлеющего разряда и формирования токовых пятен, однако, до сих пор не ясны, как и многие детали их теории.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПЛИТ РАН, ПОЗВОЛИВШИЕ СУЩЕСТВЕННО ПРОДВИНУТЬСЯ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И САМООРГАНИЗАЦИИ ТОКОВЫХ СТРУКТУР

- Рассмотрена математическая постановка начально-краевой задачи для системы нелинейных уравнений диффузионно-дрейфового приближения, широко используемой в моделировании газового разряда. Определен класс нелинейных граничных условий, обеспечивающих существование и единственность сильных решений.

- Разработан численный алгоритм второго порядка аппроксимации по пространственным координатам для моделирования динамики двумерного тлеющего разряда повышенного давления в рамках диффузионно-дрейфового приближения. Доказана корректность

математической постановки дифференциально-разностной и конечно-разностной задачи (численного алгоритма) в смысле разрешимости, неотрицательности, устойчивости, аппроксимации и сходимости к решению исходной системы нелинейных уравнений диффузионно-дрейфового приближения.

- Результаты численных расчетов в осесимметричной и плоской геометриях обосновывают достаточность только электродинамических явлений (диффузии и дрейфа заряженных частиц, нарушения квазинейтральности, ионизации и рекомбинации) для проявления процессов самоорганизации упорядоченных токовых структур в самостоятельном тлеющем разряде повышенного давления.

- Численно в рамках чисто электродинамических явлений показано, что при характерных значениях произведения давления на размер разрядного промежутка в несколько десятков см·Торр неустойчивость в слаботочном тлеющем разряде в N_2 и Ag зарождается в анодной области, на которую впоследствии по достижению возмущения катодной области накладывается процесс скоротечного образования катодного пятна с локализацией тока во всем разрядном промежутке.

- Численно установлено существование критического значения величины распределенного сопротивления анодной оксидной пленки, при превышении которой происходит полное подавление анодных токовых пятен и существенно возрастает устойчивость разряда (предельный энерговклад).

- За счет совершенствования используемых аналитических методов и выбора более реалистических аппроксимаций кинетических коэффициентов плазмы была развита нульмерная модель анодного слоя, позволившая уточнить ВАХ анодного слоя в положительных, а также в электроотрицательных газах.

- Разработана замкнутая аналитическая модель процессов самоорганизации анодных токовых пятен в тлеющем разряде, не использующая какие-либо дополнительные данные или постулаты и асимптотически эквивалентная диффузионно-дрейфовой модели газового разряда. Предложенная модель вписывается в общую концепцию активных сред с диффузией в синергетике и позволяет описывать процессы самоорганизации токовых структур в анодном слое в рамках понятий "активатора" (плотность тока) и "ингибитора" (анодное падение потенциала). Переменные модели (анодное падение потенциала и плотность тока) допускают наличие однородных стационарных состояний, из анализа устойчивости которых следует, что образование упорядоченных пространственных токовых структур можно рассматривать как следствие неустойчивости тьюринговского типа в бистабильной системе с S-образной вольт-амперной характеристикой. Получены критические условия существования и основные характеристики токовых структур в зависимости от условий и свойств среды. Определена зависимость периода токовых структур в зависимости от условий разряда.

- Теоретически (численно и на основе аналитической модели) в рамках чисто электродинамических явлений воспроизведено экспериментально известное явление самоорганизации сложных токовых структур в самостоятельном тлеющем разряде повышенного давления, включая беспороговый характер возникновения структур при первоначально однородном распределении тока, процессы вторичной перестройки структур и эффект нормальной плотности тока на аноде.

- Показана возможность увеличения периода токовых полос в процессе вторичной бифуркации из-за неустойчивости токовых полос к процессам перераспределения тока между соседними полосами.

- Определено характерное значение полного тока через пятно, разделяющее нормальное и поднормальное анодные токовые пятна.

- Установлено существование критического значения величины характеристической энергии электронов, зависящего от плотности тока, при превышении которого спонтанное образование анодных токовых пятен становится невозможным.

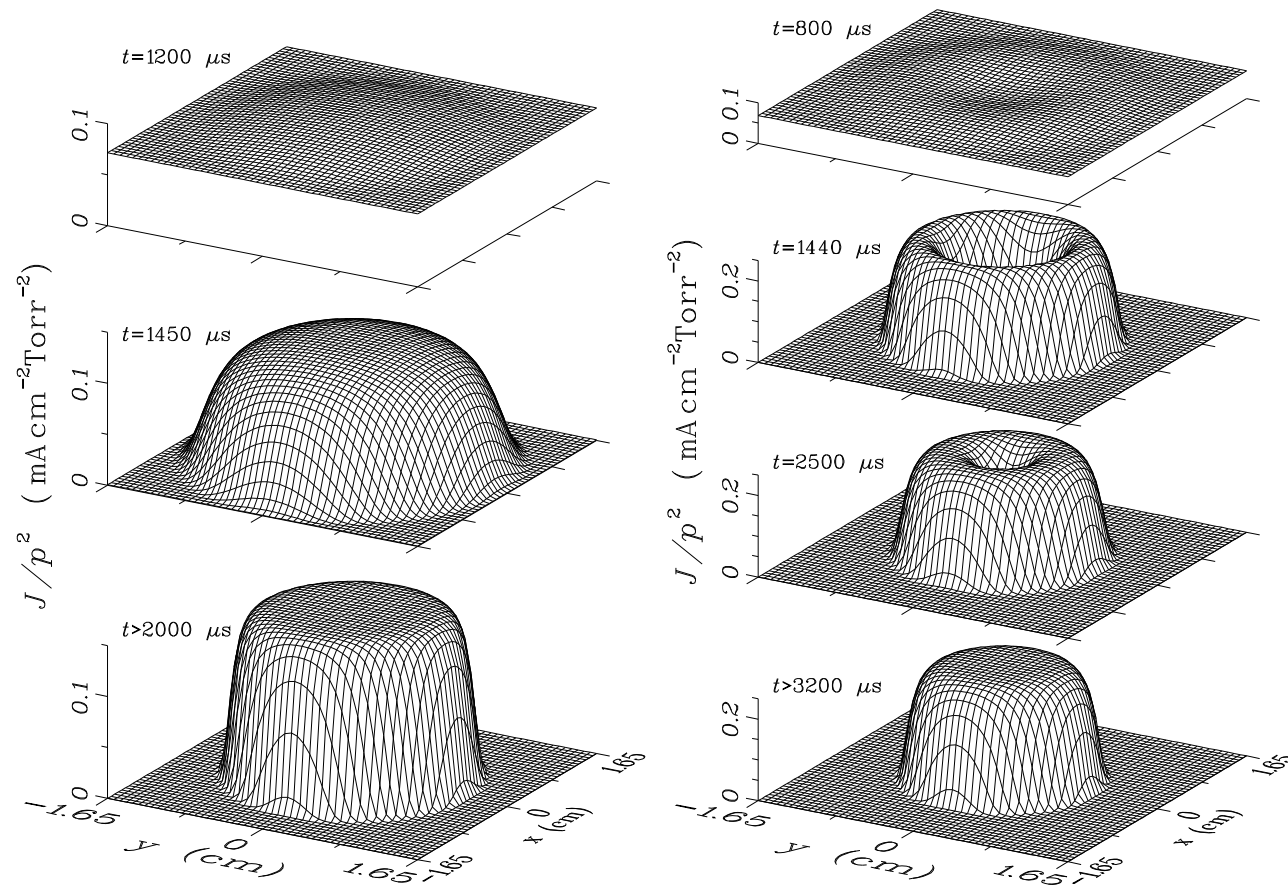


Рис. 1. Динамика формирования анодного токового пятна в азоте. Давление $p = 40$ Торр, полный ток $I = 1$ А, характеристическая энергия электронов $D_e/\mu_e = 2$ эВ, коэффициент электрон-ионной рекомбинации $\beta = 2 \cdot 10^{-7}$ см³/с.

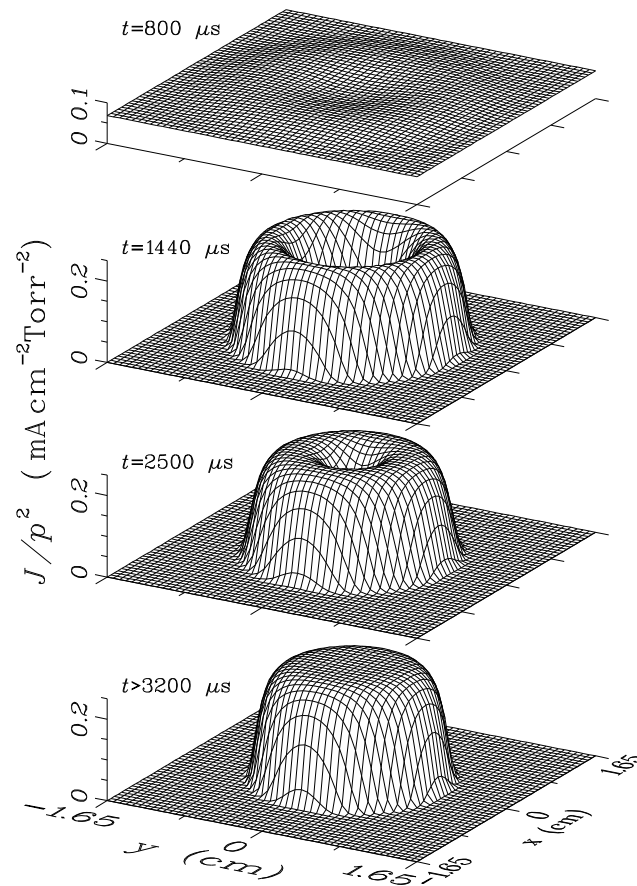


Рис. 2. Динамика формирования анодного токового пятна в азоте для тех же условий, как на рис. 1, за исключением $\beta = 0.75 \cdot 10^{-7}$ см³/с.

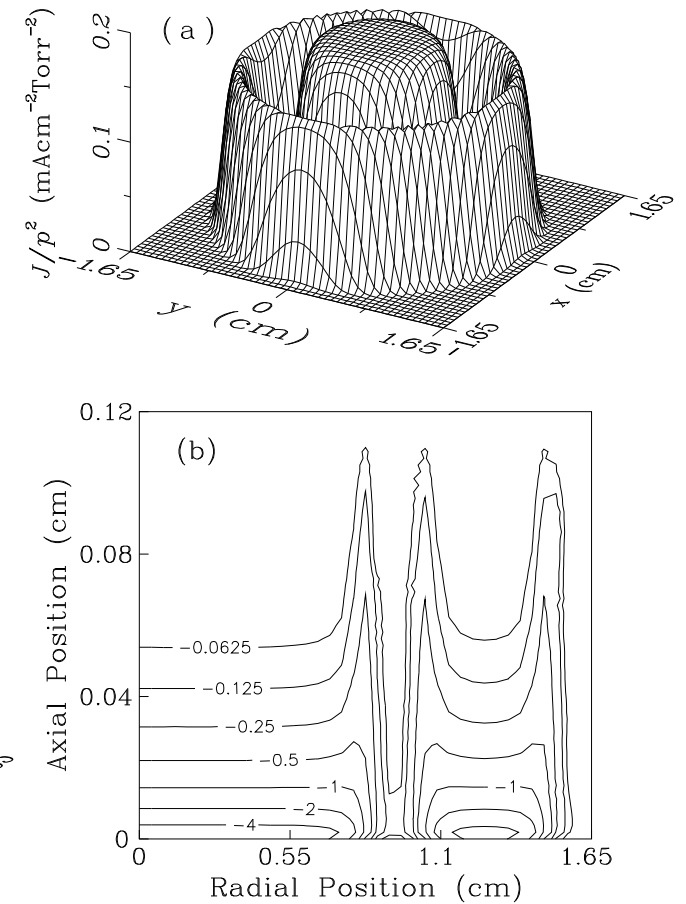


Рис. 3. Распределение приведенной плотности тока J/p^2 на аноде (a) и линии равных уровней плотности заряда (b) в случае сложной стационарной структуры для тех же условий как на рис. 1. Значения плотности заряда ρ даны в единицах 10^{10} е/см³.

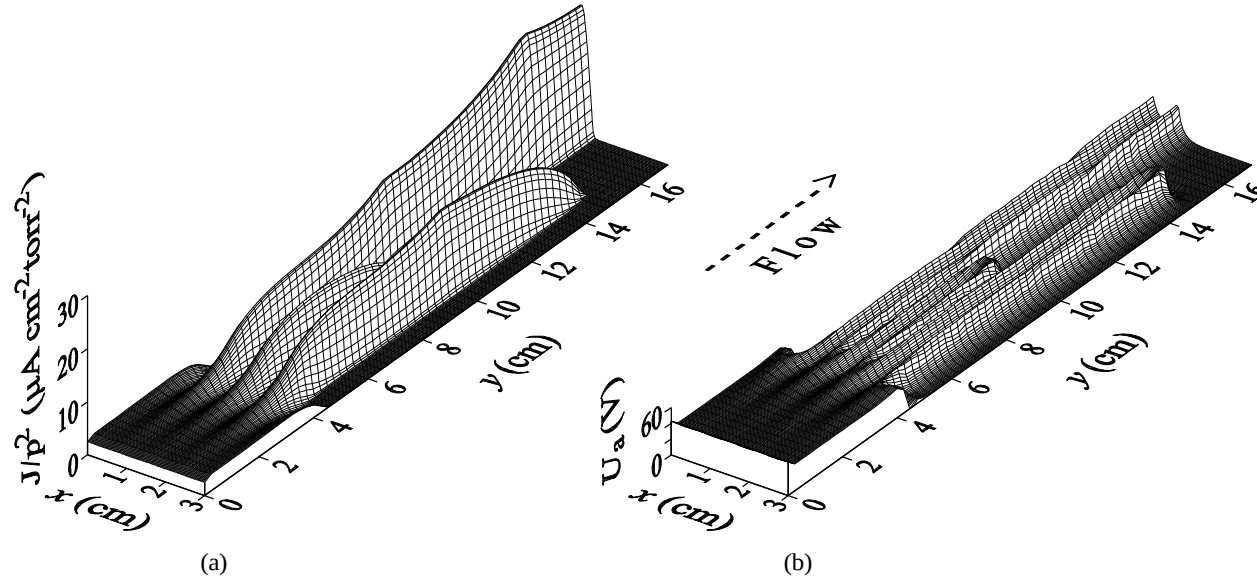


Рис. 4. Распределения приведенной плотности тока J/p^2 (a) по поверхности анода и анодного падения потенциала U_a (b) для разряда в смеси $N_2:He = 1:1$ при $p = 40$ Торр, $I = 15$ мА/см, $D_e/\mu_e = 1$ эВ, $\beta = 1 \cdot 10^{-7}$ см³/с и скорости газа $V = 50$ м/с.

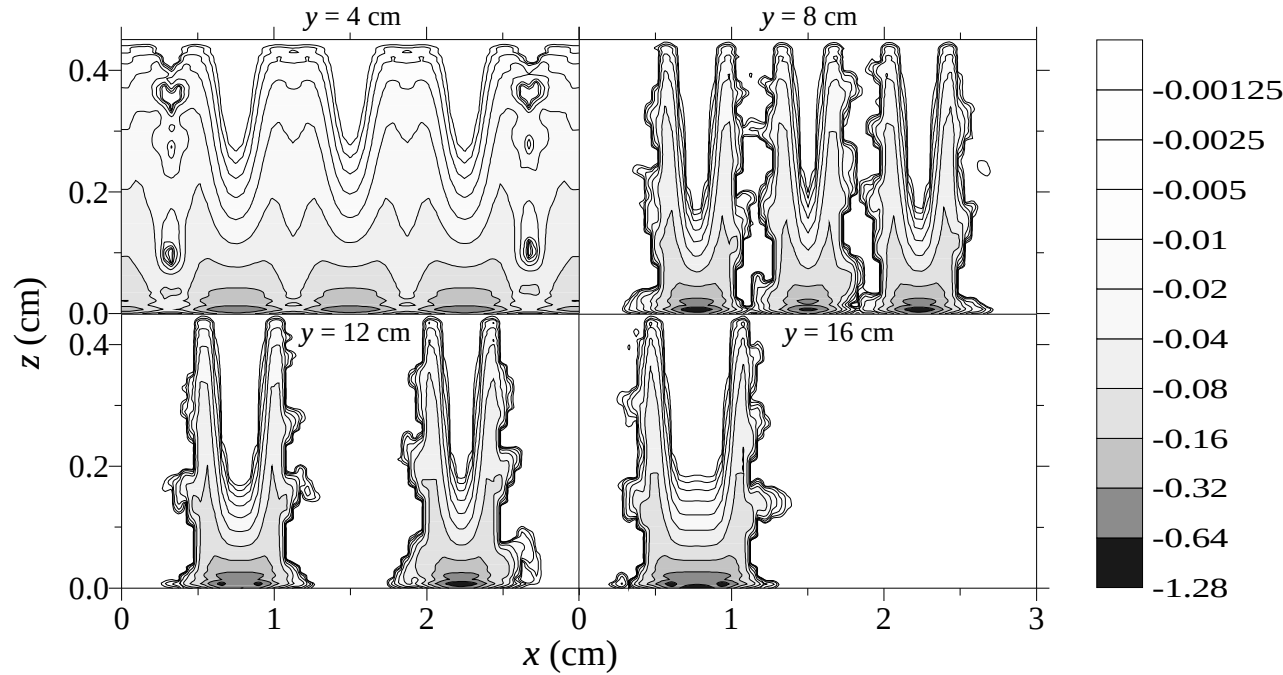


Рис. 5. Линии равных уровней плотности заряда ρ для токовой структуры, изображенной на рис. 4, при четырех значениях y вдоль потока. Контурные заряды даны в единицах 10^{10} е/см³.

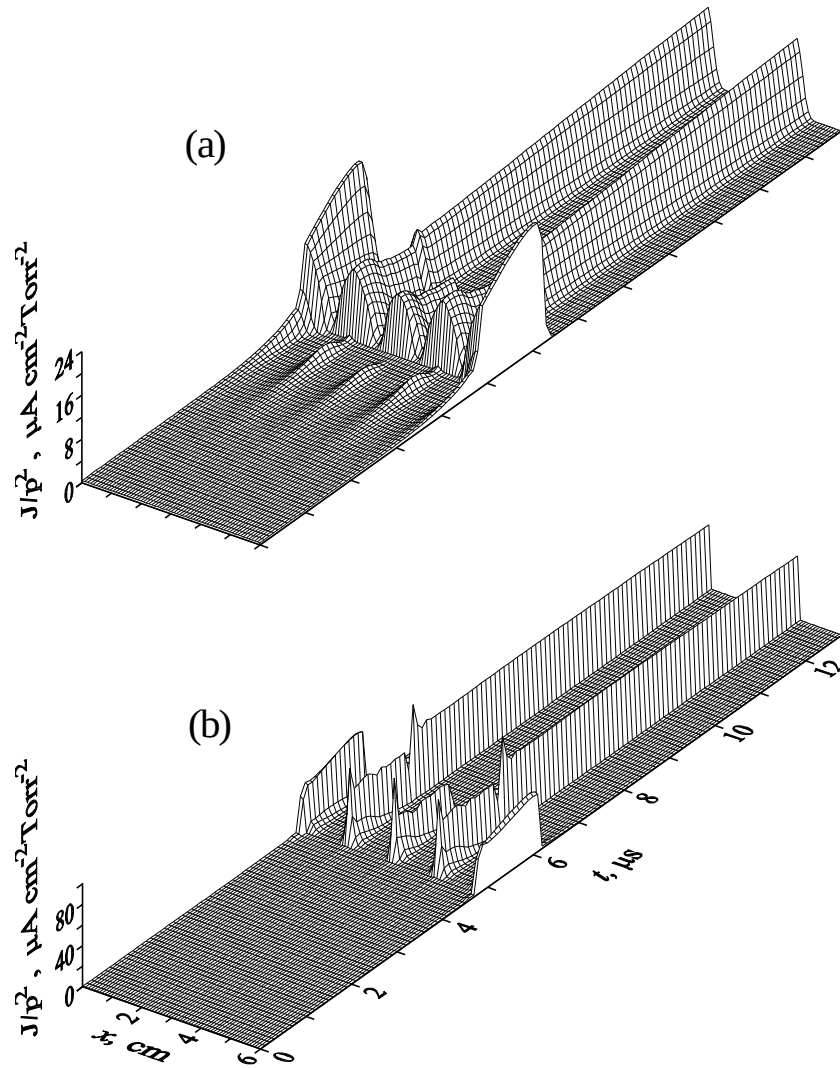


Рис. 6. Динамика формирования токовых структур на поверхностях анода (а) и катода (б) в N_2 при $p = 10$ Торр и наличии регулярных инициирующих возмущений (0.1%). Зазор $H = 1$ см, средняя плотность тока $J_{cp} = 50$ мкА/см².

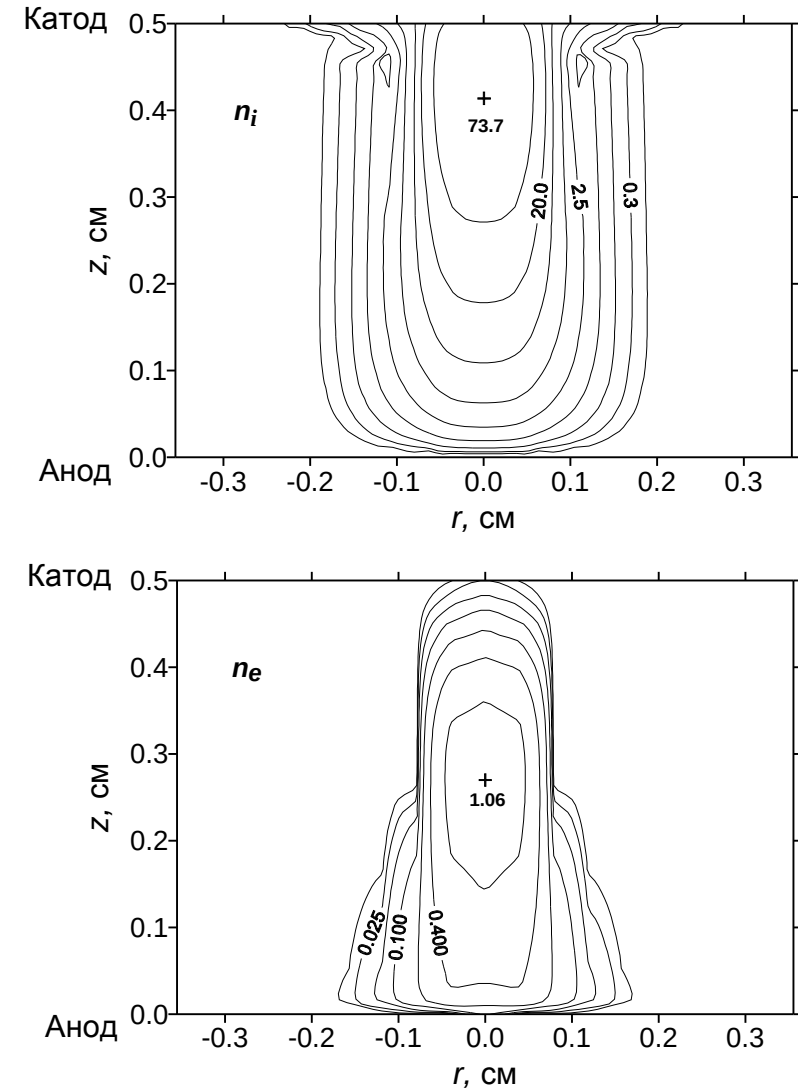


Рис. 7. Линии равных уровней для плотностей электронов n_e и ионов n_i в Ag при $p = 10$ Торр, $I = 2.31$ мкА и $D_e/\mu_e = 4$ эВ. Линий равных уровней n_e и n_i построены при каждом изменении плотности в 2 раза; цифры у кривых – плотности в 10^8 см⁻³. Значком "плюс" показаны точки максимума плотности.

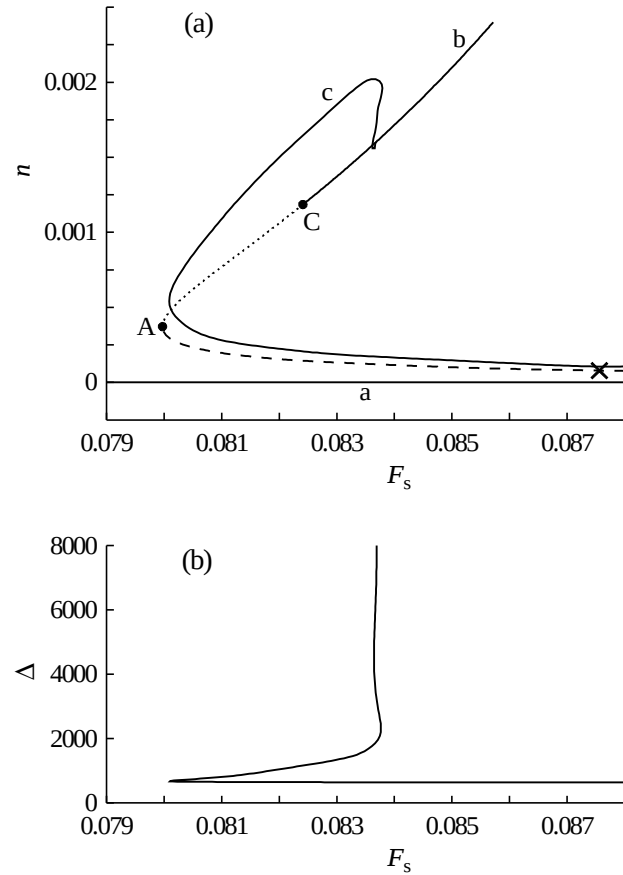


Рис. 8. (а) Бифуркационная диаграмма аналитической модели в плоскости (n, F_s) . Кривые а и б показывают зависимость безразмерной величины плотности тока n от безразмерной величины среднего электрического поля в разрядном промежутке F_s (бифуркационного параметра) для тривиального ($n = 0$) и однородного ($n > 0$) решений, соответственно. Сплошные участки кривых отвечают устойчивым состояниям, штриховые – абсолютно неустойчивым состояниям, точечные – диффузионно неустойчивым состояниям. Область неустойчивости тривиального решения (т. е. $F_s > F_0 = 0.09314$) лежит за пределами рисунка. Точки А и С обозначают бифуркацию седло-узел и критическую точку неустойчивости Тьюринга, соответственно. Кривая с показывает зависимость n_0 от F_s для локализованной одиночной токовой структуры, где n_0 соответствует n в середине этого образования.

(б) Зависимость безразмерной ширины $\Delta = \int n dx / n_0$ от F_s для локализованной токовой структуры.

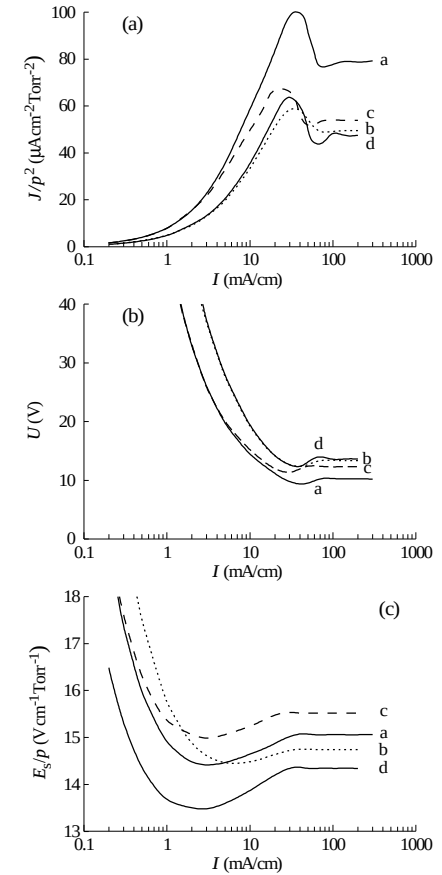


Рис. 9. Зависимости приведенной плотности тока J/p^2 (а) и анодного падения потенциала U (б) в центре одиночного токового пятна и приведенного среднего электрического поля E_s/p (с) от полного тока I через пятно. Характеристики одиночного пятна отображаются кривой с на рис. 8а. Кривые б, с и д рассчитаны с удвоенными значениями параметров D_e/μ_e , β и H , соответственно.