

УДК 533. 915

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ И
КОНТРАКЦИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В CF₄****В.А. Лисовский^{1,2}, О.И. Пелюстка¹, В.А. Коваль^{1,2}**¹ Харьковський національний університет
61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна² Научний фізико-технологічний центр МОН і НАН України
Харків, 61022, пл. Свободи, 6, Україна
E-mail: lisovskiy@yahoo.com

Received 11 February 2012, accepted 23 February 2012

В этой работе экспериментально исследованы диффузный и контрагированный режимы тлеющего разряда постоянного тока в CF₄. Найдено, что при фиксированном давлении газа область существования контрагированного режима при узких зазорах между электродами имеет неоднозначный характер. Контрагированный шнур появляется в стратифицированном положительном столбе с ростом разрядного тока. Однако в узких зазорах между электродами дальнейшее повышение разрядного тока может привести к уменьшению длины положительного столба (с одновременным значительным расширением отрицательного свечения), и контракция исчезает. В случае длинных разрядных промежутков увеличение тока не приводит к исчезновению контракции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разряд постоянного тока, контракция, диффузная мода горения разряда, диссоциация, CF₄.**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГОРІННЯ І КОНТРАКЦІЇ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ В CF₄****В.О. Лісовський^{1,2}, О.І. Пелюстка¹, В.О. Коваль^{1,2}**¹ Харківський національний університет,
61077, Харків, пл. Свободи 4, Україна² Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України
Харків, 61022, пл. Свободи, 6, Україна

У цій роботі експериментально досліджено дифузний та контрагований режими тліючого розряду постійного струму в CF₄. Знайдено, що при фіксованому тиску газу область існування контрагованого режиму обмежена з боку вузьких зазорів між електродами, ця межа має неоднозначний характер. Контрагований шнур з'являється в стратифікованому позитивному стовпі зі зростанням розрядного струму. Однак у вузьких зазорах між електродами подальше підвищення розрядного струму призводить до зменшення довжини позитивного стовпа (з одночасним значним розширенням негативного світіння), і контракція зникає. У випадку довгих розрядних проміжків збільшення струму не призводить до зникнення контракції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розряд постійного струму, контракція, дифузна мода горіння розряду, дисоціація, CF₄.**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION MODES AND CONTRACTION
OF GLOW DISCHARGE IN CF₄****V.A. Lisovskiy^{1,2}, O.I. Pelustka¹, V.A. Koval^{1,2}**¹ Kharkov National University,
61077, Kharkov, Svobody sq. 4, Ukraine² Scientific Center of Physical Technologies
Kharkiv, 61022, Svoboda Sq., 6, Ukraine

This paper studies in experiment the diffuse and contracted modes of dc glow discharge in CF₄. The existence region for the contracted mode with pressure unchanged is found to be limited from the small inter-electrode gap side, this boundary being multi-valued. A contracted column establishes in a stratified positive column with current increasing and inter-electrode gap or gas pressure fixed. However with subsequent current increase the length of the positive column decreases (with simultaneous considerable expansion of the negative glow), and contraction vanishes. At longer inter-electrode gap the current increase does not lead to contraction vanishing.

KEY WORDS: DC glow discharge, contraction, diffuse mode of the discharge, dissociation, CF₄.

Тлеющий разряд в CF₄ применяется в различных плазменных технологических процессах и устройствах: в микроэлектронике при плазменном травлении полупроводниковых материалов [1-3], в детекторах заряженных частиц [4], в импульсных разрядниках высокой мощности [5,6], в качестве газового диэлектрика [7]. Для того чтобы корректно применять тлеющий разряд, необходимо знать условия его существования и количественные характеристики в различных газах, при различных давлениях газов и геометриях разрядных трубок, поэтому явление контракции исследовалось рядом научных групп. В большинстве имеющихся работ приведены результаты для высокочастотного разряда в CF₄, в то время как тлеющий разряд в этом газе изучен не достаточно подробно. В известной нам литературе практически нет данных о режимах горения этого разряда, условиях контракции положительного столба, а единственная имеющаяся кривая зажигания в CF₄ была измерена в узком диапазоне давлений газа.

В настоящее время имеется небольшое количество статей, описывающих протекание разрядного тока в постоянном электрическом поле в CF_4 . Наибольшее число их посвящено движению электронов и их столкновениям с молекулами CF_4 [7-11]. В частности, в работах [7, 9] представлен обзор результатов о взаимодействии электронов с молекулами CF_4 (сечения столкновений, коэффициенты ионизации и прилипания, дрейфовая скорость, средняя энергия электронов и коэффициент диффузии), опубликованных к моменту их выхода. Автор работы [10] методом Монте Карло рассчитал коэффициенты переноса электронов в CF_4 в диапазоне приведенного электрического поля $0,01 \leq E/N \leq 300$ Тд. При этом результаты его расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов. Процесс диссоциативной ионизации молекул CF_4 электронным ударом экспериментально исследован авторами работы [11]. Были измерены парциальные сечения ионизации для столкновений электронов с CF_4 , в результате которых появляются положительные ионы CF_3^+ , CF_2^+ , CF^+ , C^+ , F^+ .

Кинетика образования и гибели радикалов CF_2 в плазме тетрафторметана в разряде постоянного тока была экспериментально исследована авторами работы [12]. На оси положительного столба разряда были измерены величины электрических полей, а также абсолютные концентрации CF_2 в диапазоне давлений газа до 1 Торр. На основе экспериментальных данных получена зависимость константы скорости диссоциации молекул CF_4 электронным ударом по каналу с образованием радикалов CF_2 от величины приведенного электрического поля. Авторами работы [13] методом эмиссионной спектроскопии была получена зависимость плотности атомарного фтора от давления и скорости потока в CF_4 . Показано, что интенсивность излучения атомарного фтора возрастает с повышением давления и скорости напуска газа.

Развитие ионизационно-прилипательной неустойчивости в положительном столбе разряда постоянного тока в CF_4 было экспериментально исследовано в работе [14]. Определены диапазоны давления газа и разрядного тока, в которых в положительном столбе наблюдаются бегущие волны, а также стоячие страты. Обнаружены два типа бегущих волн: низкочастотные (0,5-20 кГц) и высокочастотные (примерно 2 МГц). Получено дисперсионное соотношение для низкочастотных волн. Ионизационно-прилипательная неустойчивость экспериментально наблюдалась авторами работы [15] в разрядах в CF_4 и кислороде. Показано, что эта неустойчивость появляется при специфических величинах тока и давления газа, и что при этом возникают синхронные колебания в килогерцовом диапазоне потенциала плазмы и интенсивности излучения атомарного фтора. Проведен теоретический анализ устойчивости разряда в электроотрицательных газах. Авторы доклада [16] экспериментально исследовали пробой газа и различные режимы горения разряда в CF_4 . Были измерены кривая зажигания, вольт-амперные характеристики, а также пространственные профили излучения разряда при различных давлениях газа. Также из кривой зажигания была определена зависимость коэффициента ион-электронной эмиссии от приведенного электрического поля. Однако в работах [14-16] не были исследованы условия горения разряда в диффузном и контрагированном режимах.

В работе [17] измеренные кривые зажигания были использованы для определения зависимости первого коэффициента Таунсенда для процесса ионизации от приведенного электрического поля. Эксперименты были проведены в диапазоне средних давлений CF_4 (10 ÷ 75 Торр). Пробойные напряжения в смесях CF_4 с другими газами при высоких давлениях (порядка нескольких атмосфер) были рассчитаны авторами работы [18] на основании экспериментальных кривых зажигания для чистых газов.

Контракция — стягивание плазмы в шнур при повышении давления и росте тока. С одной стороны, шнурование разряда приводит к срыву лазерной генерации, что ограничивает сверху вкладываемую в активную среду мощность. С другой стороны, отрыв разряда от стенок трубки в приборах спектрального анализа газовых смесей позволяет уменьшить поступление в плазму примесей. Контрагированный разряд используется также в инерционно-плазменных датчиках, позволяющих за счет смещения плазменного шнура вырабатывать электрический сигнал, пропорциональный ускорению.

Целью данной работы было измерить кривую зажигания и вольт-амперные характеристики (ВАХ) тлеющего разряда постоянного тока в CF_4 при различных давлениях газа в широком диапазоне расстояний между электродами для диффузного и контрагированного режимов.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения зажигания и вольт-амперных характеристик тлеющего разряда постоянного тока использовалась разрядная камера, схема которой показана на рис.1. Кварцевая трубка имела внутренний диаметр 56 мм. Диаметры катода и анода были равны 55 мм. Эксперименты проводились с подвижным анодом, перемещение которого позволяло изменять межэлектродный зазор. Исследуемый диапазон расстояний между электродами был от 5 до 395 мм. CF_4 подавался в камеру с помощью системы напуска газа СНА-1. Для регистрации давления газа мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТ3-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного насоса, что обеспечивало предельный вакуум порядка 10^{-4} Торр. Эксперименты проводились при давлениях CF_4 $p = 0,1 - 10$ Торр в диапазоне постоянного напряжения $U_{dc} \leq 3000$ В. Источник постоянного тока подключался к катоду, а анод был заземлен. Величина разрядного тока регистрировалась цифровым амперметром, а напряжение на разряде — цифровым вольтметром. В

разрядную цепь подключалось внешнее сопротивление величиной 50 кОм, которое ограничивало ток и препятствовало возникновению катодных пятен.

Так как CF_4 - сильно электроотрицательный газ, то в областях разрядной трубки со слабым электрическим полем (например, за подвижным анодом) прилипание электронов к молекулам газа не позволяло поддерживать в них горящий разряд. Поэтому за подвижным анодом не зажигался разряд, который мог бы повлиять на характеристики плазмы между электродами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование зажигания тлеющего разряда постоянного тока в CF_4

Для зажигания тлеющего разряда необходимо, чтобы скорость рождения заряженных частиц вследствие ионизации молекул газа электронным ударом и вторичной ион-электронной эмиссии из поверхности катода была равна скорости потерь на стенках трубки вследствие диффузии и дрейфового ухода на электроды. Этот баланс должен выполняться в разрядных камерах любой геометрии.

На рис. 2 показана кривая зажигания тлеющего разряда в CF_4 , полученная в настоящей работе. Из рисунка видно, что кривая зажигания имеет стандартную U-образную форму. Минимум этой кривой зажигания находится при давлении CF_4 0,29 Торр и напряжении 409 В. Данная кривая зажигания была измерена в широком диапазоне давлений газа (от 0,03 до 9 Торр, что соответствует величине произведения давления и расстояния между электродами $pd = 0,06 - 18$ Торр·см). В литературе имеется только одна кривая зажигания, полученная другими авторами для CF_4 [16].

Эта кривая зажигания также представлена на рис.2. Она была измерена в более узком диапазоне $pd = 0,11 - 1,4$ Торр·см [16], а ее минимум смещен в область более высоких пробойных напряжений и давлений газа (485 В и 0,38 Торр, соответственно). Такое смещение вызвано тем, что авторы [16] использовали медный катод, в то время как в настоящей работе катод был изготовлен из нержавеющей стали. Ранее в работе [19] было показано, что кривые зажигания для катодов, сделанных из материалов с низким коэффициентом ион-электронной эмиссии γ (к которым относится медь), обычно проходят выше и правее на графике $U_{dc} = f(pd)$, чем кривые зажигания для катодов с более высоким коэффициентом γ . При этом минимумы кривых зажигания смещаются таким образом, что ионизационная способность электронов сохраняется максимальной. Определим величины приведенного электрического поля E/p из кривых зажигания, показанных на рис.2. В минимуме кривой зажигания, измеренной нами, $(E/p)_{\min} = (U_{dc}/pd)_{\min} = 1410$ В/(см·Торр), а для кривой зажигания, измеренной авторами работы [16], $(E/p)_{\min} = 1276$ В/(см·Торр). То есть, значения приведенного электрического поля, полученные нами и авторами [16], близки.

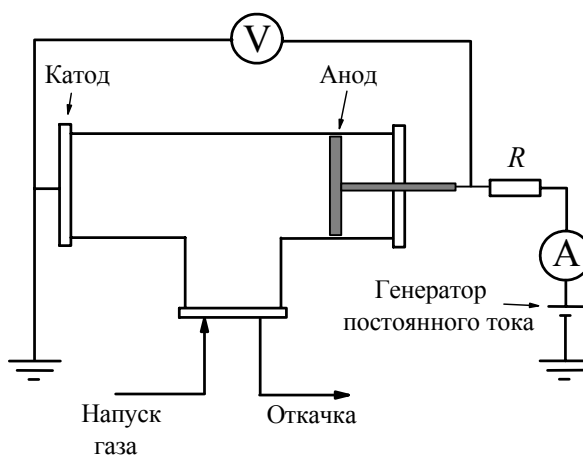


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

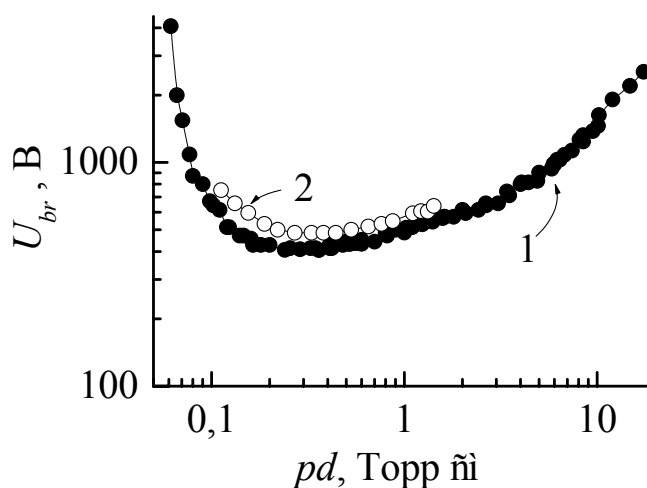


Рис.2. Кривые зажигания разряда постоянного тока в CF_4 :

1 – измерена в данной работе при зазоре 20 мм;

2 – измерена в работе [16] при зазоре 11 мм.

Исследование вольт-амперных характеристик в различных режимах горения тлеющего разряда в CF_4

Целью данного исследования было измерить вольт-амперные характеристики, а также сделать фотографии тлеющего разряда в CF_4 для различных режимов горения, ряда расстояний между электродами и давлений газа. На рис.3 показаны фотографии разряда в длинной трубке при давлении газа $p = 0,5$ Торр. На этих фотографиях катод находится слева, а анод располагается справа за пределами фотографий. При величине разрядного тока 1 мА разряд горит в диффузном режиме, положительный столб заполняет все поперечное сечение трубки и состоит из множества узких страт. Повышение разрядного тока до 2 мА привело к тому, что в положительном столбе начал образовываться более ярко светящийся плазменный шнур, т.е. началась контракция разряда. Однако при этой величине разрядного тока положительный столб пока заполняет все сечение трубки, и мы видим при этих условиях переходный режим, в котором одновременно существуют диффузный и контрагированный режимы. При более высоких разрядных токах (на рис.3 это соответствует фотографии для 20 мА) положительный столб уже не касается стенок трубки и горит в виде узкого контрагированного шнура. Диаметр этого шнура увеличивается с ростом разрядного тока. Диффузный режим соответствует аномальному режиму тлеющего разряда, т.к. разряд покрывает всю поверхность катода, а рост разрядного тока сопровождается повышением напряжения между электродами. Контрагированный режим аналогичен нормальному режиму тлеющего разряда, т.к. разрядное свечение заполняет только часть поверхности катода.

На рис.4 представлены вольт-амперные характеристики разряда в CF_4 в широком диапазоне давлений для пяти различных расстояний между электродами. Для зазора между электродами 10 мм разряд почти при всех представленных на рисунке давлениях газа горел в диффузном режиме, заполняя практически все сечение трубки. И только при давлениях, начиная с 1,5 Торр, повышение разрядного тока приводит к переходу из диффузного в контрагированный режим. Как было сказано выше, диффузный режим имеет растущую вольт-амперную характеристику. Вольт-амперная характеристика контрагированного режима обычно падающая (разрядный ток растет с одновременным понижением напряжения между электродами) либо имеет вид фактически вертикальной линии.

Увеличение расстояния между электродами до 50 мм привело к тому, что контрагированный режим начал наблюдаться при более низких давлениях газа, уже с 0,8 Торр. Если при узком зазоре между электродами переход из диффузного в контрагированный режим был непрерывным во всем исследованном диапазоне давлений газа, то теперь при давлении 3 Торр переход стал скачкообразным и даже с небольшим гистерезисом. Для расстояния между электродами 100 мм скачкообразный переход из диффузного в контрагированный режим виден уже на вольт-амперной характеристике для давления газа 2 Торр. Вольт-амперная характеристика для давления 3 Торр стала падающей даже в диффузном режиме, т.к. разрядное пятно занимает только часть поверхности катода и наблюдается нормальный режим горения. Обычно в нормальном режиме вольт-амперная характеристика разряда вертикальная либо падающая.

При расстоянии между электродами 200 мм контрагированный режим наблюдался уже с давлений газа, начиная с 0,5 Торр. Для давления 3 Торр вольт-амперная характеристика имеет только ветвь, соответствующую контрагированному режиму. При таком давлении разряд после зажигания сразу горит в виде контрагированного шнура. При понижении тока разряд не переходит в диффузный режим, а погасает.

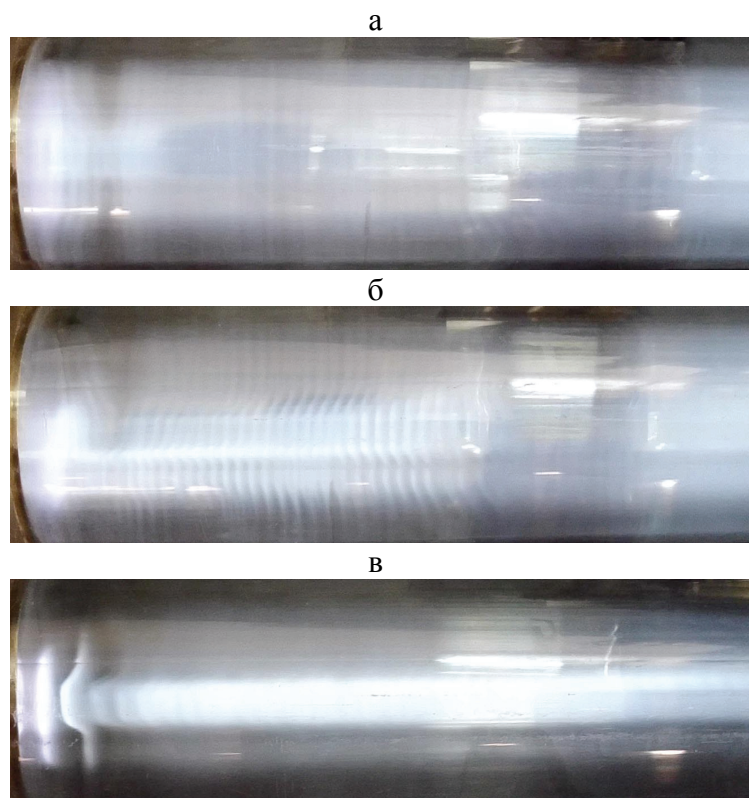


Рис.3. Фотографии разряда в диффузном и контрагированном режимах. CF_4 , $p = 0,5$ Торр, $I = 1$ мА (а), 2 мА (б) и 20 мА (в). Катод располагается слева, анод – справа за пределами фотографий.

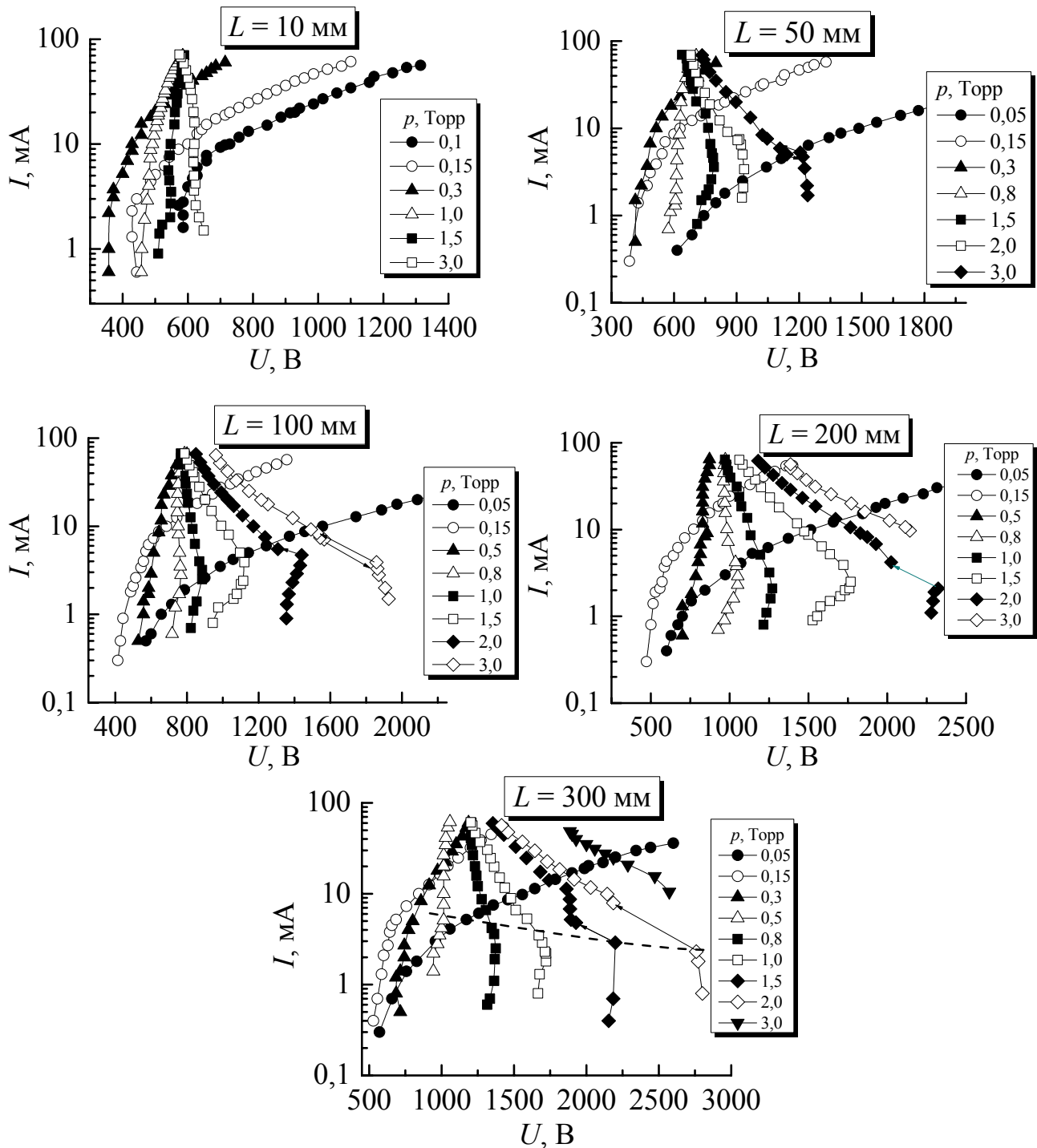


Рис.4. Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда при различных давлениях CF_4 и зазорах между электродами $L = 10$ мм, 50 мм, 100 мм, 200 мм и 300 мм.

Подобное поведение вольт-амперных характеристик наблюдается и для расстояния между электродами 300 мм. Отметим, что даже в такой длинной трубке при низких давлениях газа (менее 0,4 Торр) разряд горит только в диффузном режиме. Это объясняется тем, что при таких условиях разряд не содержит положительного столба, а состоит из катодного слоя, отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства, которое достигает анода. И лишь при более высоких давлениях появляется положительный столб, который заполняет значительную часть зазора между электродами. Наблюдения показывают, что контрагировать может лишь положительный столб, имеющий достаточно большую длину (не менее 1-1,5 см).

Тлеющий разряд в CF_4 переходит из диффузного в контрагированный режим, когда напряжение на электродах и разрядный ток достигают некоторых критических значений U_c и I_c . На рис.5 показаны зависимости критического напряжения и тока от расстояния между электродами для фиксированного давления

газа. Из рисунка видно, что переход в контрагированный режим в широком диапазоне зазоров между электродами происходит при практически неизменном разрядном токе (примерно 1,5-2 мА), в то время как уменьшение зазора сопровождается понижением критического напряжения перехода U_c . Контрагированный режим может наблюдаться при напряжениях и токах, превышающих критические. Однако дальнейшее сужение разрядного промежутка приводит к тому, что контрагированный режим перестает наблюдаться. При давлении CF_4 $p = 0,5$ Торр и зазоре менее 27,5 мм разряд горит только в диффузном режиме. При зазорах от 27,5-30 мм зависимости критических напряжения и тока от расстояния L имеют неоднозначный характер, т.е. появившийся контрагированный шнур с ростом напряжения и тока исчезает. Это значит, что при низких давлениях газа и небольших расстояниях между электродами возникшая контракция положительного столба может быть сорвана дальнейшим ростом разрядного тока. Причиной этого является то, что с ростом разрядного напряжения и тока наблюдается увеличение длины отрицательного свечения с одновременным уменьшением длины положительного столба. Как уже было сказано выше, контрагировать может только достаточно длинный положительный столб, состоящий не менее из 4-5 страт (в электроотрицательных газах, к которым относится и CF_4 , положительный столб обычно состоит из множества узких страт), при этом его длина должна быть не менее 10-15 мм. При достаточно больших токах положительный столб может вообще исчезнуть, при этом разряд состоит только из катодного слоя, отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства, которое простирается до самого анода. Разряд без положительного столба не может контрагировать и горит только в диффузном режиме.

На рис.6 показаны фотографии разряда как раз в таком диапазоне зазоров между электродами и давлений газа, в котором появившуюся контракцию положительного столба можно сорвать повышением разрядного тока. На первой фотографии мы видим тлеющий разряд в диффузном режиме, положительный столб которого состоит из 3-х страт, а также вблизи анода наблюдается анодное свечение. Повышение разрядного тока сначала привело к тому, что в диффузном стратифицированном положительном столбе появился контрагированный шнур, при этом мы видим на фотографии переходный режим с одновременным существованием как диффузного, так и контрагированного режимов. Однако в этом случае стратифицированный положительный столб диффузного режима отрывается от стенок, перестает их касаться. При этом из фотографии видно, что в данном случае положительный столб состоит из 4-х страт (а не из 3-х, как было на предыдущей фотографии). По-видимому, в переходном режиме приведенное электрическое поле E/N вблизи стенок трубки становится меньше пороговой величины, когда частота ионизации превышает частоту прилипания электронов к молекулам газа. В таком слабом электрическом поле скорость потерь электронов из-за прилипания становится больше, чем скорость рождения вследствие ионизации, поэтому мы видим на фотографии темные области на периферии разряда.

При дальнейшем росте разрядного тока длина отрицательного свечения увеличивается, а положительный столб немного сужается (как видно из 3 фотографии на рис.6, теперь положительный столб снова состоит только из 3-х страт). Контрагированный шнур полностью исчезает, но страты положительного столба все еще остаются оторванными от стенок разрядной трубки.

Эффект расконтрагирования положительного столба с ростом разрядного тока описан, например, в работе [20]. Этот эффект наблюдается при столь высоких разрядных токах, что температура нейтрального газа в разрядном шнуре достигает нескольких тысяч градусов, при этом начинается термическая диссоциация молекулярных ионов. Скорость диссоциативной рекомбинации значительно больше скорости трехчастичной рекомбинации с участием атомарных ионов [21]. Расконтрагирование объясняется увеличением размера приосевой области, в которой температура газа столь велика, что относительная концентрация молекулярных ионов близка к нулю. В этой нагретой области рекомбинации электронов практически не происходит, что приводит к расширению плазменного столба.

В случае CF_4 срыв контракции происходит из-за того, что повышение разрядного тока приводит к расширению отрицательного свечения и одновременному сужению положительного столба. И когда длина

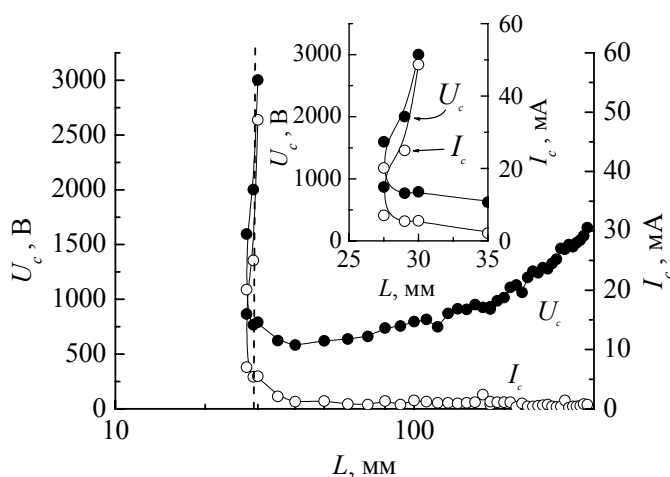


Рис.5. Зависимости критического напряжения U_c и тока I_c для перехода из диффузного в контрагированный режим от расстояния между электродами для давления CF_4 $p = 0,5$ Торр. Левая граница области существования контрагированного режима имеет неоднозначный характер.

положительного столба становится менее 10-15 мм, контрагированный шнур расплывается, разряд возвращается в диффузный режим.

Одним из основных механизмов нелинейного рождения заряженных частиц является ионизационно-перегретый [21], который наблюдается при высоких разрядных токах и температурах нейтрального газа в плазменном объеме. Однако в CF_4 контракция положительного столба происходит при малых разрядных токах, обычно 1,5-2 мА. Столь низкий разрядный ток не может заметно разогреть нейтральный газ. Поэтому нужно

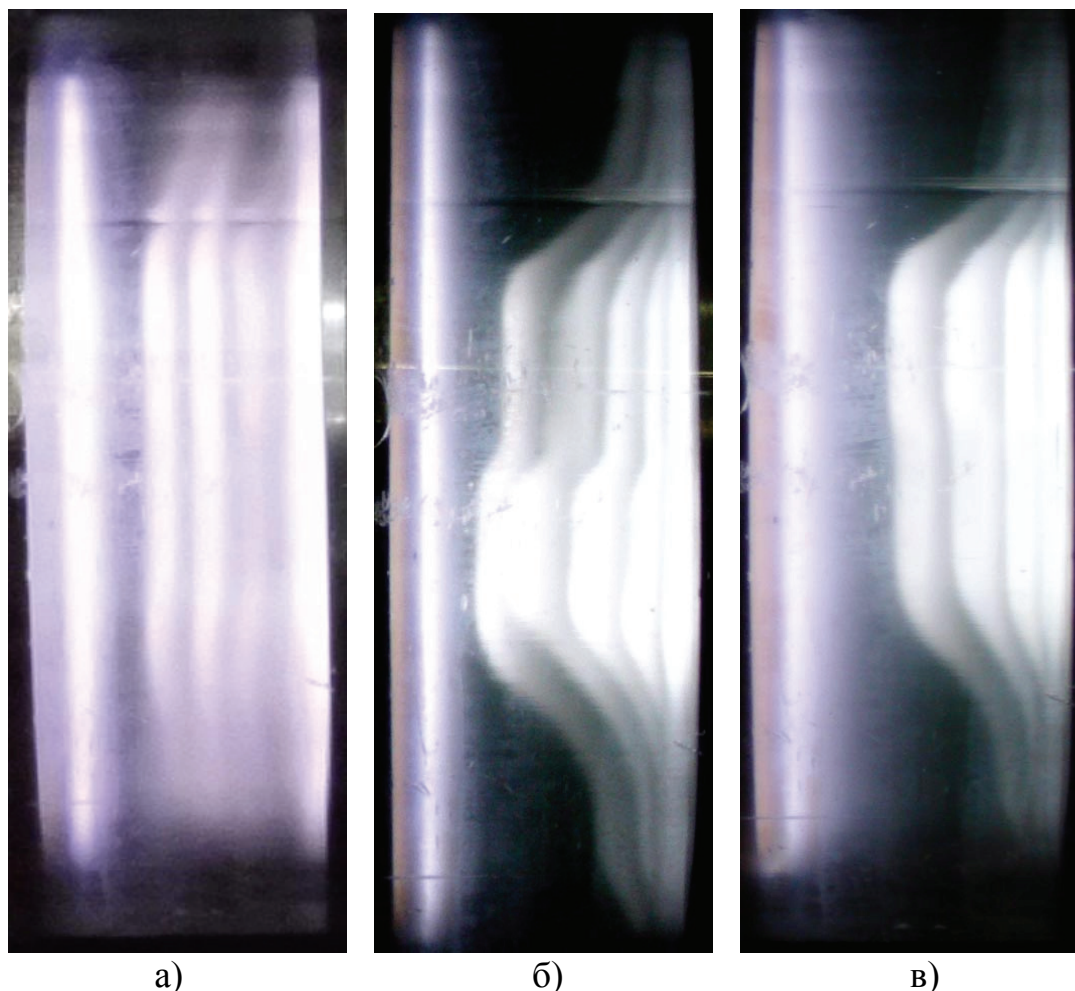


Рис.6. Фотографии разряда при давлении CF_4 $p = 1$ Торр, расстоянии между электродами 20 мм, величинах разрядного тока а) 1,7 мА, б) 26 мА, в) 63 мА.

выяснить, какой же именно механизм приводит к нелинейному росту концентрации электронов в положительном столбе и, как следствие, к его контракции.

В CF_4 , как и в ряде других технологических газов (SF_6 , NF_3 , SiH_4 [22, 23]), потенциал ионизации радикалов, образующихся при диссоциации, ниже, чем у первоначальных молекул [24]. Так, для прямой ионизации молекул CF_4 электронным ударом нужна пороговая энергия 15,69 эВ. Процесс диссоциации начинается с пороговой энергии электронов 12 эВ. Для ионизации радикалов CF_3 и CF_2 нужны электроны с энергией, примерно равной 10 эВ. С увеличением разрядного тока возрастают концентрация и число электронов с высокой энергией (хвоста функции распределения электронов по энергиям). При достижении током критического значения в разряде, по-видимому, начинается интенсивная диссоциация молекул CF_4 электронами. Образовавшиеся при этом радикалы фактически являются легкоионизируемой добавкой к основному газу, и их появление приводит к резкому росту разрядного тока. Наиболее высокие концентрации электронов имеют место вблизи оси разрядной трубки, поэтому именно здесь и начинается диссоциация молекул газа, в конечном итоге приводящая к контракции положительного столба тлеющего разряда. Основным механизмом потерь электронов является их прилипание к атомам фтора и радикалам CF_3 , образующимся в процессе диссоциации молекул CF_4 .

ВЫВОДЫ

В настоящей работе была измерена кривая зажигания тлеющего разряда в CF_4 . Исследования были выполнены в диапазоне произведения давления и расстояния между электродами $pd = 0,06 - 18$ Торр·см.

Экспериментально изучены диффузный и контрагированный режимы тлеющего разряда в CF_4 . Получено, что область существования контрагированного режима (при фиксированном давлении газа) при узких зазорах между электродами имеет неоднозначный характер. Показано, что при низких давлениях CF_4 и узких зазорах стратифицированный положительный столб контрагирует с ростом разрядного тока. Однако при дальнейшем росте разрядного тока уменьшается длина положительного столба, и контракция исчезает. В случае длинных разрядных промежутков и больших давлений газа увеличение тока не приводит к исчезновению контракции.

Предложен механизм, приводящий к нелинейному росту концентрации электронов в положительном столбе в CF_4 . Так как пороговые энергии ионизации радикалов CF_3 и CF_2 меньше потенциала ионизации первоначальных молекул CF_4 , то образовавшиеся радикалы являются легкоионизируемой добавкой к основному газу. Быстрая ионизация радикалов электронным ударом происходит в области максимальной плотности плазмы и приводит к контракции положительного столба тлеющего разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aydil E.S. Plasma Etching, in Encyclopedia of Applied Physics. - VCH Publishers. – Vol.14. - 1996. - P. 171-197.
2. Shul R.J., Pearton S.J. Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques. – Berlin: Springer, 2000. – 654 p.
3. Winters H.F., Coburn J.W. Surface science aspects of etching reactions // Surface Science Reports. – 1992. - Vol. 65, № 4-6. - P. 161-270.
4. Christophorou L.G., McCorkle D.L., Maxey D.V., Carter J.G. Fast gas mixtures for gas-filled particle detectors // Nuclear instruments and methods. – 1979. - Vol.163. – P. 141-149.
5. Christophorou L.G., Hunter S.R., Carter J.G., Mathis R.A. Gases for possible use in diffuse-discharge switches // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol.41, № 2. – P. 147-149.
6. Hunter S.R., Carter J.G., Christophorou L.G. Electron transport studies of gas mixtures for use in e-beam controlled diffuse discharge switches // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol.58, № 8. – P. 3001-3015.
7. Christophorou L.G., Olthoff J.K., Rao M.V.V.S. Electron interactions with CF_4 // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1996. – Vol.25, №5. – P. 1341-1388.
8. Hunter S.R., Carter J.G., Christophorou L.G. Electron motion in the gases CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 and $n\text{-C}_4\text{F}_{10}$ // Phys. Rev. A. – 1988. – Vol.38, № 1. – P. 58-69.
9. Christophorou L.G., Olthoff J.K. Electron interactions with plasma processing gasses: an update for CF_4 , CHF_3 , C_2F_6 , and C_3F_8 // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1999. – Vol.28, №4. – P. 967-982.
10. Vasenkov A.V. Monte Carlo simulation of electron transport in carbon tetrafluoride discharge plasma // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol.88, № 2. – P. 626-634.
11. Torres I., Martinez R., Castano F. Electron-impact dissociative ionization of fluoromethanes CHF_3 and CF_4 // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2002. – Vol.35, № 11. – P. 2423-2436.
12. Ivanov V.V., Klopovskiy K.S., Lopaev D.V., Proshina O.V., Rakhimov A.T., Rakhimova T.V., Slovetskiy D.I., Volynets V.N. Образование радикалов CF_2 при диссоциации молекул CF_4 электронным ударом в плазме газового разряда // Физика плазмы. – 1999. – Т.25, № 8. – С. 716-724.
13. Coburn J.W., Chen M. Dependence of F atom density on pressure and flow rate in CF_4 glow discharges as determined by emission spectroscopy // J. Vac. Sci. Technol. – 1981. – Vol.18, № 2. – P. 353-356.
14. Ishikawa I., Suganomata Sh., Matsumoto M. Attachment-enhanced instability in CF_4 positive columns // Jap. J. Appl. Phys. – 1987. – Vol.26, № 12. – P. 2140-2141.
15. Descoedres A., Sansonnens L., Hollenstein Ch. Attachment-induced ionization instability in electronegative capacitive RF discharges // Plasma Sources Sci. Technol. – 2003. – Vol.12, № 2. – P. 152-157.
16. Scoro N., Malovic G., Maric D., Petrovic Z.Lj. Low-pressure breakdown and voltage-current characteristics of dc discharge in CF_4 // Proc. 28th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, July 15-20, 2007, Prague. - P. 1997-2000.
17. Bozin S.E., Goodyear C.C. Growth of ionization currents in carbon tetrafluoride and hexafluoroethane // Brit. J. Appl. Phys. – 1968. – Vol.1. – P. 327-334.
18. Nema R.S., Kulkarni S.V., Husain E. On calculation of breakdown voltages of mixtures of electron attaching gases // IEEE Trans. Electrical Insulation. – 1982. – Vol.17, № 5. – P. 434-440.
19. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2000. - Vol. 31, № 21. - P. 2722 - 2730.
20. Eletskiy A.V. Механизмы сзатиya тлейushchego разряда // Химия плазмы. - 1982. - Vyp. 9. – С. 151–178.
21. Rayzer Yu.P. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
22. Lisovskiy V., Booth J.-P., Jolly J., Martins S., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. Modes of RF capacitive discharge in low-pressure sulfur hexafluoride // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. - Vol. 40, №22. - P. 6989–6999.
23. Lisovskiy V., Booth J.-P., Landry K., Douai D., Cassagne V., Yegorenkov V. RF discharge dissociative mode in NF_3 and SiH_4 // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. - Vol.40, № 21. - P. 6631–6640.
24. Christophorou L.G., Olthoff J.K. Fundamental electron interactions with plasma processing gases.- New York: Kluwer Academic, 2004. – 783 p.