
**ЭЛЕКТРОННАЯ
И ИОННАЯ ЭМИССИЯ**

УДК 537.5

РАЗВИТИЕ ПРОБОЯ В ВОЗДУХЕ В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ ИМПУЛЬСА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

© 2019 г. В. Г. Андреев¹, В. А. Вдовин², *¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

*E-mail: vdv@cplire.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 29.04.2019 г.

Принята к публикации 06.05.2019 г.

Приведены результаты прецизионных измерений скорости развития пробоя в воздухе при атмосферном давлении в системе электродов острие–плоскость. Показано, что пробой начинается при достижении порогового напряжения $U_{\text{пор}}$, величина которого тем выше, чем больше радиус острейного электрода, а скорость развития пробоя 6.2 мм/нс практически не зависит от радиуса острейного электрода и одинакова для импульсов с пиковыми напряжениями 25...30 кВ. Визуализация структуры разряда с использованием алюминиевой пленки толщиной 4 нм показала наличие большого числа микроканалов с размерами от 5 до 20 мкм.

DOI: 10.1134/S0033849419090018

ВВЕДЕНИЕ

Электрический пробой в газах под действием высоковольтных импульсов наносекундной длительности изучается интенсивно с начала 60-х годов прошлого столетия. Имеется ряд обзоров, в которых освещаются основные результаты экспериментальных исследований и рассматриваются теоретические модели и физические механизмы развития сверхбыстрых разрядов [1–3]. Особенности такого типа разрядов являются однородность пространственной структуры и высокая скорость развития пробоя, составляющая сотые и десятые доли скорости света. В последнее время появился ряд приложений, стимулировавших рост интереса к разрядам в газах под действием наносекундных высоковольтных импульсов [4–6]. Поджиг обедненных горючих смесей наносекундными разрядами обеспечивает одновременное воспламенение смеси во всем объеме и, как следствие, повышение эффективности работы двигателя внутреннего сгорания. Малая длительность разряда снижает тепловую нагрузку на электрод при высоком импульсном токе и обеспечивает значительное увеличение его ресурса. Развитие и внедрение новых технологий в процессы поджига горючих смесей требует дополнительного изучения процессов развития пробоя в различных условиях, влияния амплитуды и формы высоковольтного импульса на скорость про-

боя смеси, процессов тепловыделения и развития газодинамических течений [7, 8]. Одной из основных характеристик электрического разряда является скорость развития пробоя. Основное число экспериментальных работ посвящено исследованиям скорости волны ионизации при импульсном пробое длинных трубок (длинных разрядных промежутков от 1 до 100 см). Накоплен большой фактический материал по скоростям движения волн ионизации в разрядных промежутках в условиях больших перенапряжений.

В данной работе приводятся результаты прецизионных измерений скорости развития пробоя в воздухе при атмосферном давлении при умеренных значениях перенапряжения. Основное внимание уделено пробую, инициируемому импульсом положительной полярности, приложенному к острейному электроду. Такая схема наиболее интересна с точки зрения различных приложений [4, 9]. Степень неоднородности разряда и распределение стримеров по сечению пучка визуализировано с помощью ультратонких металлических пленок на диэлектрической подложке.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Пробой воздушного промежутка изучали на установке, показанной на рис. 1. Высоковольтный импульс варьируемой амплитуды генериро-

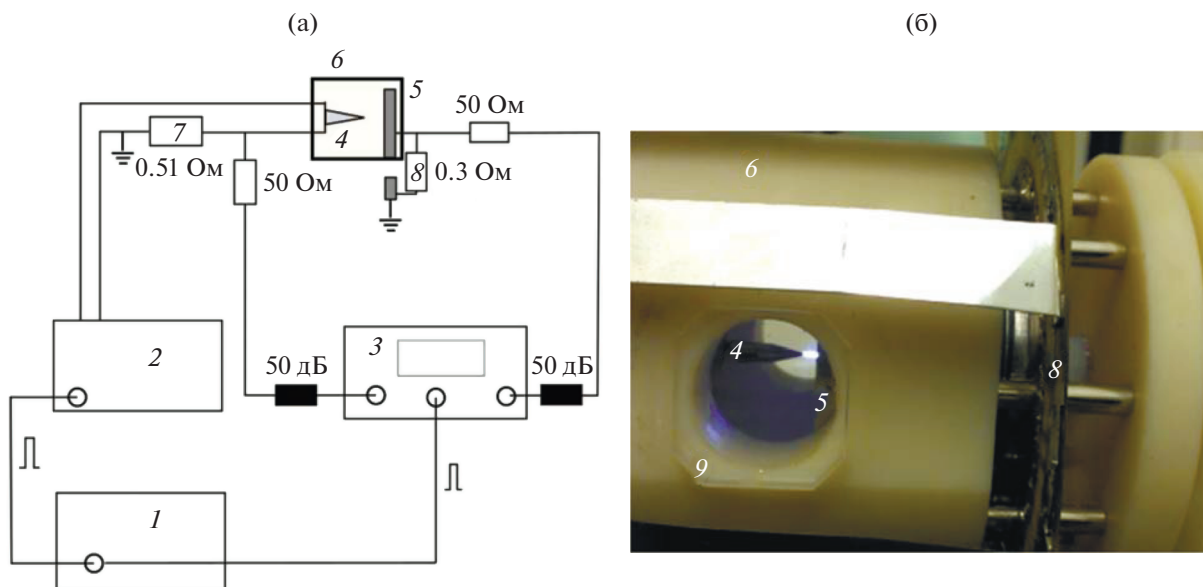


Рис. 1. Схема (а) и фото (б) экспериментальной установки: 1 – генератор сигналов, 2 – источник высоковольтных импульсов, 3 – осциллограф, 4 – острый электрод, 5 – плоский электрод, 6 – разрядная кювета, 7 – ШОТ, 8 – ШРТ, 9 – прозрачное окно.

вался источником FID Technology (FID, GmbH) и подавался через кабель на систему острие–плоскость. Длительность импульса 6 нс, длительность фронта 2 нс, максимальное пиковое напряжение 30 кВ. Система электродов находилась в разрядной кювете, в которой имелось два прозрачных окна для наблюдения и фоторегистрации разряда. Плоский электрод мог плавно перемещаться в процессе измерений в пределах 1...12 мм. К плоскому электроду крепился шунт разрядного тока (ШРТ), позволяющий измерять ток разряда. Шунт был изготовлен из сопротивлений номиналом 30 Ом в количестве ста штук, установленных параллельно. Напряжение с сопротивления шунта (0.3 Ом) через согласующее сопротивление 50 Ом и высокочастотный кабель подавалось на один из входов четырехканального осциллографа Agilent MSO 9404A с полосой 4 ГГц. Запуск высоковольтного источника осуществлялся импульсом, формируемым генератором сигналов Rigol DG4102 с фронтом менее 1 нс. Этот же импульс использовали для синхронизации осциллографа.

Импульс напряжения, подаваемый на острый электрод, измеряли шунтом обратного тока (ШОТ), установленным в разрыв оплетки силового кабеля. Такая конструкция шунта часто используется для измерения формы высоковольтных импульсов [10]. ШОТ сопротивлением 0.51 Ом был изготовлен из 25 малоиндуктивных резисторов номиналом 12.7 Ом, впаянных параллельно. ШОТ устанавливали на расстоянии 198 см от выходного разъема источника и 206 см от острейного электрода, что позволяло измерять форму импульса

напряжения длительностью 6 нс без помех, возникающих при отражении импульса от концов кабеля. Время задержки прихода импульса на острый электрод относительно его появления на ШОТ составляло 10.40 нс, что с хорошей точностью соответствовало расчетному значению, полученному из известной скорости распространения электромагнитной волны в кабеле 1.98×10^8 м/с. Напряжение с ШОТ через согласующий резистор 50 Ом, кабель и ослабители с коэффициентом 50 дБ подавалось на вход осциллографа. Все входы осциллографа имели сопротивление 50 Ом для минимизации отражений импульсных сигналов. Длина высокочастотных кабелей, ведущих от обоих шунтов, была одинаковой с погрешностью, не превышающей 0.2 см.

В качестве острых электродов в данных экспериментах были использованы конусы, изготовленные из инструментальной нержавеющей стали и имеющие следующие размеры: внешний диаметр 4 мм, высота 10 мм, радиус закругления 50 и 25 мкм. При определении скорости распространения пробоя измеряли время задержки появления тока в цепи ШРТ при изменении расстояния между острым и плоским электродами. Синхронизация осциллографа осуществлялась по импульсу запуска высоковольтного источника. Высоковольтный импульс в источнике генерировался с задержкой относительно запускающего импульса, причем эта задержка случайным образом изменялась в пределах нескольких наносекунд. Компенсация влияния нестабильности запуска проводилась при последующей обработке импульсов, из-

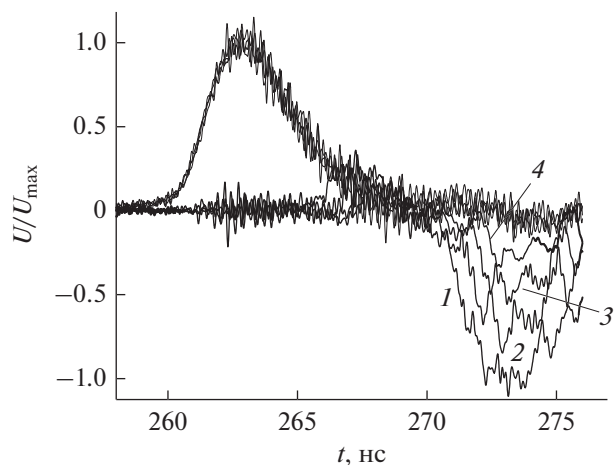


Рис. 2. Импульсы ШОТ (положительной полярности) и импульсы ШРТ (отрицательной полярности), измеренные при расстояниях между электродами $d = 1$ (1), 5 (2), 8 (3), 11 мм (4). Пиковое значение напряжения в импульсе $U_{\max} = 30$ кВ.

меренных при различных расстояниях между электродами. Для этого все импульсы ШОТ подбирали так, чтобы задержка между ними равнялась нулю с погрешностью, не превышающей 0.01 нс. После этого импульсы ШРТ также оказывались синхронизованы, а возникающая между ними временная задержка определялась только временем пробоя промежутка между электродами. Скорость развития пробоя вычисляли по межэлектродному расстоянию, известному с погрешностью, не превышающей 0.1 мм, и измеренной задержке прихода импульса на ШРТ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Импульсы ШОТ (положительной полярности) и импульсы ШРТ (отрицательной полярности), измеренные при различных расстояниях между электродами, приведены на рис. 2. Пиковое значение напряжения в импульсе 30 кВ. Импульсы ШОТ совмещены друг с другом путем процедуры подбора задержки, описанной выше. Временной сдвиг между импульсами ШОТ и ШРТ представляет собой сумму постоянной задержки, определяемой временем распространения высоковольтного импульса в кабеле от места расположения ШОТ до острия (10.4 нс) и переменной задержки, определяемой временем распространения пробоя в межэлектродном промежутке. При увеличении межэлектродного промежутка задержка увеличивается, а амплитуда разрядного тока падает.

На рис. 3 представлены измеренные задержки импульсов ШРТ в зависимости от расстояния между электродами d при пиковых напряжениях $U_{\max} = 30, 20$ и 15 кВ. Отсчет задержки ведется от импульса, зарегистрированного при расстоянии

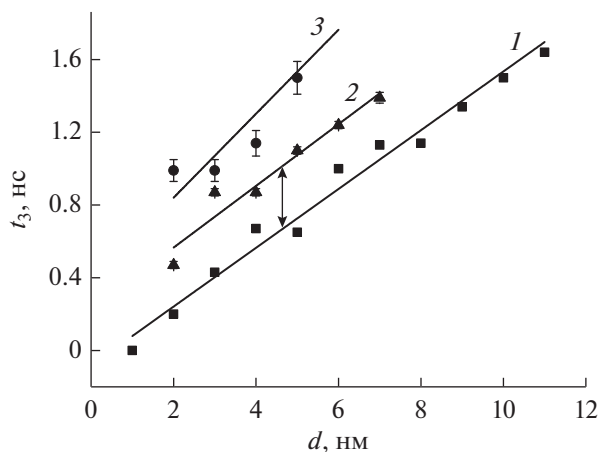


Рис. 3. Задержка t_3 импульсов ШРТ в зависимости от расстояния d между электродами при пиковом напряжении $U_{\max} = 30$ (1), 20 (2) и 15 кВ (3). Прямые 1–3 проведены по методу наименьших квадратов. Стрелкой показан временной сдвиг (0.34 нс) между прямыми 1 и 2.

1 мм между электродами при $U_{\max} = 30$ кВ. При уменьшении максимального напряжения в импульсе также уменьшается и максимальное межэлектродное расстояние, при котором наблюдался пробой. Для $U_{\max} = 20$ и 15 кВ пробой прекращался при межэлектродных расстояниях 8 и 6 мм соответственно. Измеренные значения задержек достаточно хорошо описываются линейными зависимостями, показанными линиями на графике. По наклону прямых, проведенных по методу наименьших квадратов определена скорость распространения пробоя при пиковых напряжениях $U_{\max} = 30$ и 20 кВ: $v_d = (6.2 \pm 0.2) \times 10^6$ м/с и $v_d = (5.9 \pm 0.2) \times 10^6$ м/с соответственно, что составляет примерно 0.02c, где $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. Уменьшение пикового напряжения U_{\max} от 30 до 20 кВ приводит к росту задержки для одних и тех же межэлектродных расстояний на постоянную величину 0.34 нс (показана стрелкой на рис. 3), что обусловлено увеличением задержки достижения пробойного напряжения, равного, по нашим оценкам, 9.5 кВ. Когда пиковое напряжение в импульсе ($U_{\max} = 15$ кВ) становится близко к напряжению пробоя (9.5 кВ), скорость развития пробоя уменьшается до значения $v_d = (4.3 \pm 0.4) \times 10^6$ м/с, при этом погрешность измерения скорости возрастает вследствие нестабильности временного положения фронта разрядного импульса.

На рис. 4 показаны импульсы ШОТ (положительной полярности) и импульсы ШРТ (отрицательной полярности), измеренные при фиксированном межэлектродном расстоянии $d = 1$ мм для различных пиковых напряжений. Импульсы ШОТ для всех напряжений совпадают, что было

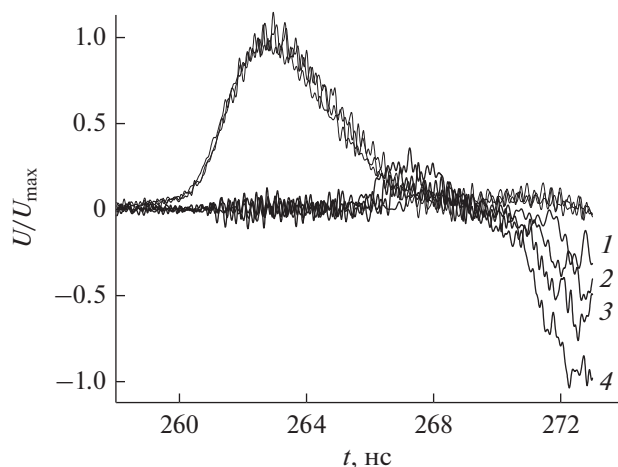


Рис. 4. Импульсы ШОТ (положительной полярности) и импульсы ШРТ (отрицательной полярности), измеренные при расстоянии между электродами $d = 1$ мм и различном пиковом напряжении: $U_{\max} = 10$ (1), 15 (2), 20 (3) и 30 кВ (4).

обеспечено процедурой подбора задержек, описанной выше. Для повышения точности измерений временной задержки амплитуда импульса ШОТ также выравнивалась путем умножения на соответствующий нормировочный коэффициент. Задержка появления разрядного тока растёт с уменьшением напряжения U_{\max} . При межэлектродном расстоянии 1 мм разряд начинается при достижении порогового напряжения $U_{\text{пор}} = 9.5$ кВ, что регистрировалось по возникновению тока ШРТ. Длительность фронта высоковольтного импульса практически не зависит от напряжения и составляет 2 нс, поэтому с увеличением пикового напряжения U_{\max} пороговое напряжение пробоя достигается быстрее.

На рис. 5 приведено время задержки начала развития пробоя, измеренное по моменту возникновения тока разряда в зависимости от напряжения между электродами (при расстоянии $d = 1$ мм). Это время задержки (кривая 1) растёт практически по линейному закону при уменьшении напряжения U_{\max} . Для сравнения на этом же графике (кривая 2) показано время задержки достижения порогового напряжения $U_{\text{пор}} = 9.5$ кВ, измеренное для импульсов с различным пиковым значением по отношению к импульсу с напряжением $U_{\max} = 30$ кВ. Эта задержка измерялась путем совмещения времени начала высоковольтных импульсов с различными пиковыми значениями (рис. 6). Отметим хорошее совпадение измеренных значений обеих задержек для импульсов с пиковыми напряжениями $U_{\max} = 20$ и 25 кВ. С уменьшением пикового напряжения ($U_{\max} = 15$ и 10 кВ) и приближением его значения к $U_{\text{пор}}$ время

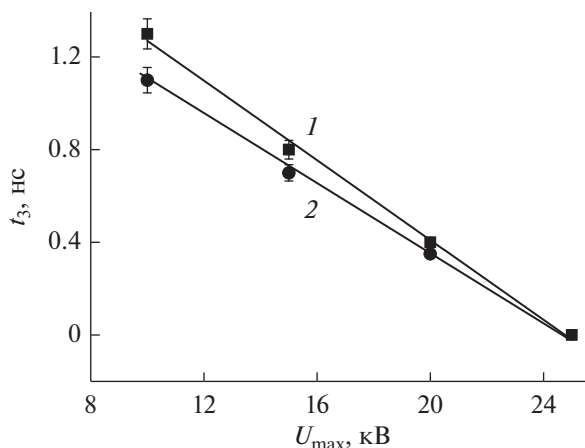


Рис. 5. Задержка начала возникновения тока разряда (1) в зависимости от пикового напряжения U_{\max} (при $d = 1$ мм). Время задержки достижения порогового напряжения $U_{\text{пор}} = 9.5$ кВ (2) для импульсов с различным значением U_{\max} по отношению к импульсу с $U_{\max} = 30$ кВ. Аппроксимирующие прямые проведены по методу наименьших квадратов.

задержки начала пробоя становится заметно больше. Это объясняется как небольшим затягиванием фронта высоковольтного импульса, так и снижением скорости развития пробоя при малых напряжениях.

Аналогичные измерения были проведены при использовании острейшего электрода, радиус острия которого был вдвое больше (50 мкм). Скорость развития пробоя при пиковом напряжении $U_{\max} = 30$ кВ в пределах погрешности измерений совпала для обоих электродов (рис. 7). Однако абсолютные значения времени задержки развития пробоя в системе с 50-мкм электродом при одина-

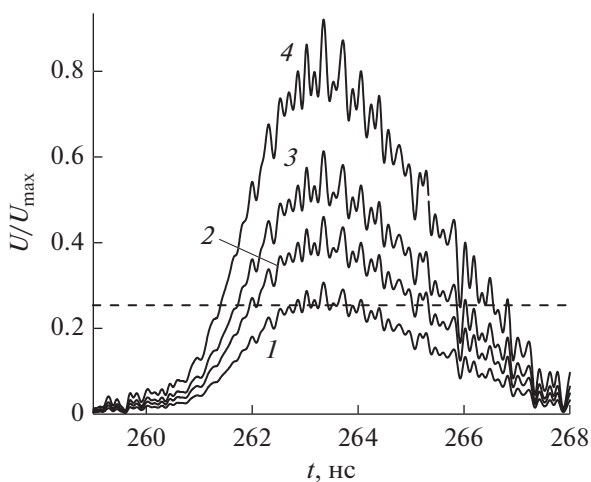


Рис. 6. Импульсы ШОТ, измеренные при $d = 1$ мм и различных пиковых напряжениях: $U_{\max} = 10$ (1), 15 (2), 20 (3) и 30 кВ (4). Штриховой линией показано напряжение пробоя, равное 9.5 кВ.

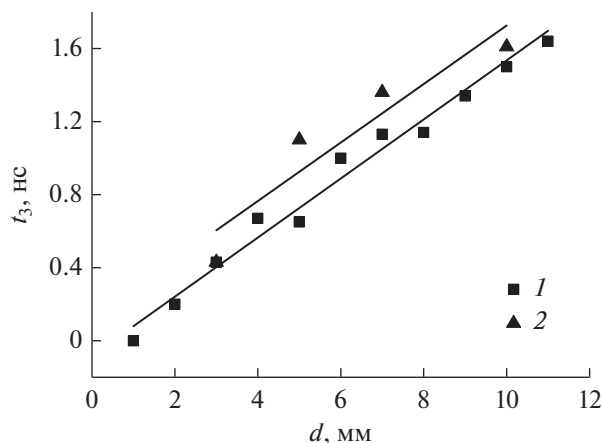


Рис. 7. Задержки импульсов ШРТ в зависимости от расстояния между электродами при пиковом напряжении 30 кВ, измеренные для острых электродов радиусом 25 (1) и 50 мкм (2). Прямые проведены по методу наименьших квадратов.

ковых межэлектродных расстояниях и фиксированном пиковом напряжении 30 кВ превышали на 0.2 нс соответствующие значения для системы с 25-мкм электродом. Это объясняется ростом пробойного напряжения в системе с менее острым электродом. Величина пробойного напряжения для острейшего электрода с радиусом 50 мкм увеличилась на 2 кВ и составила 11.5 кВ.

3. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ РАЗРЯДА

Разряд, инициированный импульсом длительностью в несколько наносекунд, выглядит как достаточно однородный светящийся цилиндр диаметром 1.5...2 мм (см. рис. 16). В реальности такой разряд состоит из достаточно большого числа токковых каналов (стримеров), радиус которых варьируется от единиц до десятков микрометров [11]. Визуализация пространственной структуры разряда оптическими методами достаточно затруднительна. В [12] был предложен метод визуализации, основанный на анализе модификации приповерхностных слоев фольги из меди после воздействия плазмы объемного разряда. В частности, было показано, что воздействие плазмы разряда наносекундной длительности приводит к очистке поверхности фольги от углерода на глубину в несколько десятков нанометров. При этом наблюдалась кольцевая структура таких очищенных областей. В работе [13] для регистрации микроструктуры разряда была использована алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Фольгу закрепляли в диэлектрическом кольце, которое помещали в середину разрядного промежутка параллельно плоскому электроду. Показано, что для использованных экспериментальных условий искровой канал диа-

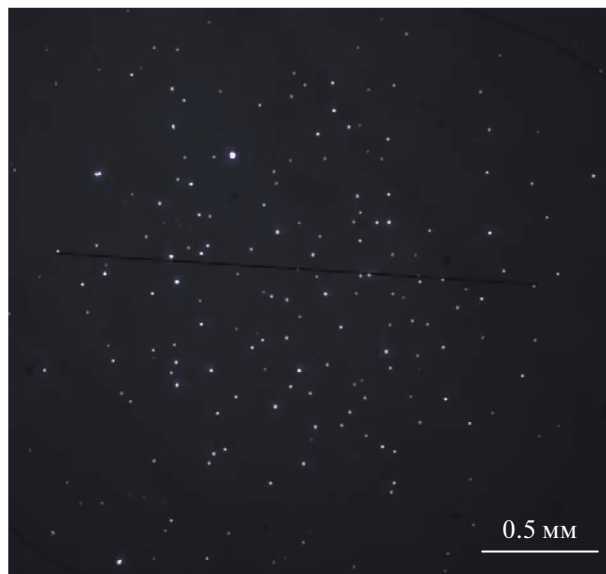


Рис. 8. Фотография поверхности алюминиевой пленки толщиной 4 нм на кварцевой подложке после воздействия одного импульса разряда ($U_{\max} = 30$ кВ). Пленка находилась на расстоянии 4 мм от острейшего электрода радиусом 50 мкм. Белые точки соответствуют местам локального разрушения пленки.

метром 0.1...0.4 мм представлял собой совокупность большого числа (100...1000 штук) микроканалов с диаметрами 5...10 мкм, примерно равномерно распределенных по сечению канала.

Однако наши попытки использовать методики, предложенные в указанных выше работах, не увенчались успехом, что связано с малой длительностью импульса и ограниченностью пикового напряжения (30 кВ). На фольге толщиной 10 мкм можно было зафиксировать всего несколько следов от каналов с максимальным током. Поэтому метод, предложенный в [13], был модифицирован — вместо фольги микронной толщины была использована алюминиевая пленка толщиной 4 нм, напыленная на кварцевую подложку толщиной 2 мм и диаметром 20 мм. Подложку с пленкой закрепляли на плоском электроде так, чтобы пленка была ориентирована на острейший электрод. Первоначально поверхность пленки была достаточно однородной, без видимых повреждений. На рис. 8 показана поверхность пленки, сфотографированная под микроскопом, после воздействия одиночного разряда с пиковым значением напряжения 30 кВ. Поверхность пленки находилась на расстоянии 4 мм от острейшего электрода. Поверхность, куда был направлен разряд, покрыта белыми точками, средний диаметр которых порядка 15 мкм. Максимальный размер белой точки 20 мкм, минимальный — менее 5 мкм. В этих местах пленка испарилась под действием тока и обнажилась кварцевая подложка, пропускающая

свет. Все точки распределены в круге диаметром порядка 2 мм. Каждая точка соответствует стримеру, а ее диаметр пропорционален току конкретного стримера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие пробоя в воздухе в сильно неоднородном поле наносекундного импульса при умеренных перенапряжениях происходит по стримерному механизму. Стримеры формируются вблизи острейшего электрода и двигаются к плоскому электроду со скоростями порядка 5...10 мм/нс. Разряд состоит из большого числа стримеров, которые занимают область, диаметр которой порядка 1...2 мм. Пробой начинается при достижении напряжения $U_{\text{пор}}$, величина которого тем выше, чем больше радиус острейшего электрода. В наших измерениях были получены значения $U_{\text{пор}} = 9.5$ и 11.5 кВ для электродов с острями, радиус которых 25 и 50 мкм. Скорость развития пробоя практически не зависит от радиуса острейшего электрода и одинакова для импульсов с одним и тем же пиковым напряжением $U_{\text{макс}}$. При фиксированном радиусе острейшего электрода скорость развития пробоя не зависит от величины разрядного промежутка при $U_{\text{макс}}$, превышающих $U_{\text{пор}}$ как минимум в два раза. При $U_{\text{макс}}$, сравнимых с пробойным напряжением $U_{\text{пор}}$, скорость развития пробоя падает. При увеличении разрядного промежутка d ток разряда уменьшается и полностью прекращается при $d = d_{\text{макс}}$. Величина $d_{\text{макс}}$ уменьшается с уменьшением пикового напряжения импульса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-29-09581 и 18-29-02094).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // Успехи физ. наук. 1990. Т. 160. С. 50.
2. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филогин И.В. // Успехи физ. наук. 1994. Т. 164. С. 263.
3. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н. // Докл. II Всерос. конф. по физической электронике. 2001. С. 53.
4. Lo A., Frat F., Domingues E. et al. // Proc. Combustion Institute. 2017. V. 36. P. 4087.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.071>
5. Barbosa S., Pilla G., Lacoste D.A. et al. // Philos. Trans. R. Soc.—Math. Phys. Eng. Sci. 2015. V. 373. P. 20140335.
6. Pilla G., Galley D., Lacoste D.A. et al. // IEEE Trans. 2006. V. PS-34. P. 2471.
7. Briels T.M.P., Kos J., Winands G.J.J. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 234004.
8. Xu D.A., Lacoste D.A., Rusterholtz D.L. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 121502.
9. Lo A., Cessou A., Boubert P., Vervisch P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 115201.
10. Василяк Л.М., Красночуб А.В. // Электрон. обработка материалов. 2013. Т. 49. № 5. С. 74.
11. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997.
12. Шулепов М.А., Тарасенко В.Ф., Гончаренко И.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 7. С. 51.
13. Перминов А.В., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 9. С. 52.