ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 1, с. 89–95

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.385

РЕГИСТРАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ВАРЬИРУЕМЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА

© 2020 г.
С. Г. Давыдов[a], А. Н. Долгов[a], М. А. Карпов[a], А. В. Корнеев[a,*], Д. В. Никишин[a], А. А. Пшеничный[a], Р. Х. Якубов[a]

[a] ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, ул. Сущёвская, 22
**e-mail: vniia4@vniia.ru*

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.
После доработки 24.05.2019 г.
Принята к публикации 31.05.2019 г.

Изучался процесс коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика путем регистрации изображений излучающей в оптическом диапазоне спектра плазмы разряда. Была использована двухканальная электрооптическая система регистрации изображений на основе электронно-оптического преобразователя (э.о.п.). Каждый канал содержал блок генерации стробирующего импульса по фотокатоду э.о.п., транспортирующий объектив, э.о.п., к которому для считывания информации с его экрана через проекционный объектив стыковалась цифровая п.з.с.-камера (п.з.с. – приборы с зарядовой связью). На основе анализа полученных экспериментальных данных высказано предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела ультрафиолетового диапазона в процессе формирования токового канала в разряде.

DOI: 10.31857/S0032816219060041

ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы – изучить некоторые аспекты процесса перехода межэлектродного промежутка катод–анод вакуумного коммутатора в проводящее состояние при инжекции в него плазмы вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. В первую очередь нас интересуют физические механизмы образования проводящей среды в межэлектродном пространстве, что важно для решения задачи быстрой коммутации токов кило- и мегамперного диапазона в разреженной среде и достижения высоких скоростей нарастания тока в сильноточных разрядах [1, 2]. Оптические средства диагностики плазмы, позволяющие с высоким пространственным и временным разрешением воссоздавать структуру и динамику плазменных объектов, показывают себя весьма информативным инструментом исследований [3, 4].

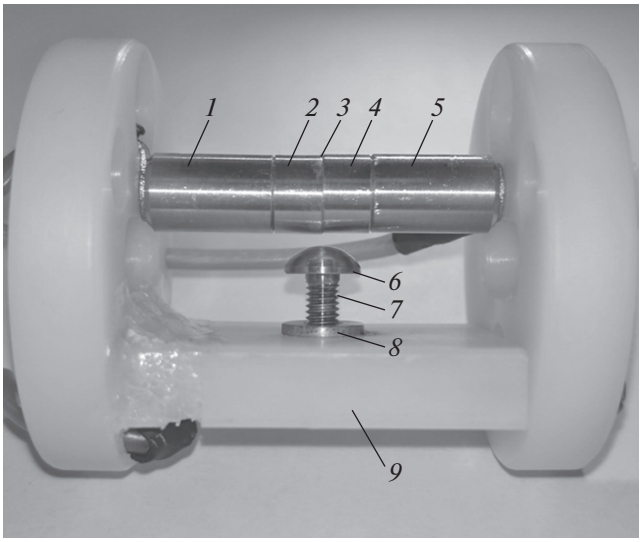

Рис. 1. Внешний вид коммутатора. *1* – катод; *2* – сменяемое навершие катода; *3* – диэлектрическая шайба; *4* – сменяемое навершие поджигающего электрода; *5* – поджигающий электрод; *6* – анод; *7* – токовод анода; *8* – основание анода; *9* – диэлектрический каркас разрядного устройства.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на экспериментальном стенде, позволяющем осуществлять натурное моделирование процесса коммутации ко-

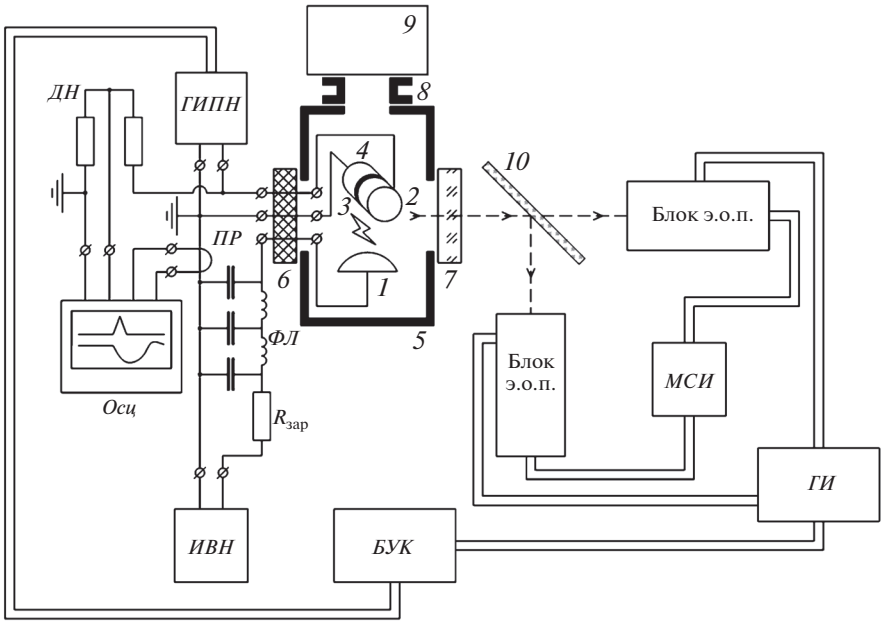

Рис. 2. Схема эксперимента. *1* – анод; *2* – поджигающий электрод; *3* – диэлектрическая шайба; *4* – катод; *5* – вакуумная камера; *6* – фланец с изолированными высоковольтными тоководами; *7* – оптическое окно; *8* – вакуумный тракт; *9* – средства откачки и контроля вакуума; *10* – светоделительное зеркало; *ГИПН* – генератор импульса поджигающего напряжения, *ДН* – низкоиндуктивный омический делитель напряжения, *ПР* – пояс Роговского, *Осц* – осциллограф, *ФЛ* – коммутируемая цепь (формирующая линия с сосредоточенными параметрами), $R_{зар}$ – зарядное сопротивление, *ИВН* – источник высокого напряжения, *БУК* – блок управления каналами включения э.о.п., *ГИ* – генератор импульсов включения э.о.п., *МСИ* – модуль сохранения изображений.

роткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. В качестве разрядного устройства был использован вакуумный коммутатор, внешний вид которого показан на рис. 1. Общая схема эксперимента представлена на рис. 2.

Основные элементы разрядного устройства – анод, катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба, разделяющая катод и поджигающий электрод и плотно зажатая между ними. Электроды закреплены в диэлектрическом каркасе. Катод, поджигающий электрод и диэлектрическая шайба – соосные цилиндры одного диаметра (6 мм). Катод и поджигающий электрод снабжены сменяемыми навершиями, непосредственно контактирующими с диэлектрической шайбой. Анод – куполообразный (∅ 6 мм), имеет продолжением токовод, который ввинчивается в основание ∅ 7 мм, выполненное из латуни. Зазор катод–анод равен 1 мм. Толщина диэлектрической шайбы 100 мкм. Материал электродов – нержавеющая сталь, шайбы – слюда. Разрядное устройство размещается в вакуумной камере, откачиваемой до давления остаточного газа 10^{-2} Па, снабженной вакуумно-плотными выводами-тоководами, позволяющими подключать электроразрядное устройство к внешним цепям, и оптически прозрачным окном для вывода за пределы камеры излучения плазмы разряда.

Разрядное устройство выступает в роли коммутатора с переменным сопротивлением для *LCR*-контура. Катод заземлен, анод до начала коммутации находится под положительным потенциалом до 3 кВ. Процесс коммутации стартует при подаче на поджигающий электрод положительного относительно катода импульса напряжения амплитудой до 4 кВ и скоростью нарастания $(1–2) \cdot 10^9$ В/с. Происходит пробой по поверхности диэлектрической шайбы, и плазма, образованная продуктами эрозии, создает проводящую среду в промежутке катод–анод.

Амплитуда тока поджига достигает 10 А, амплитуда тока в промежутке катод–анод при коротком замыкании – 250–300 А. Продолжительность импульса тока при закорачивании промежутка катод–анод определяется параметрами коммутируемой

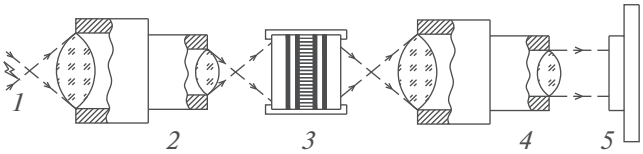

Рис. 3. Функциональная схема блока э.о.п. *1* – излучающий в оптическом диапазоне объект (плазма разряда); *2* – транспонирующий объектив “Юпитер-3”; *3* – э.о.п. ЭПМ-102Г; *4* – проекционный объектив “Вега-12Б”; *5* – п.з.с.-камера SDU-274.

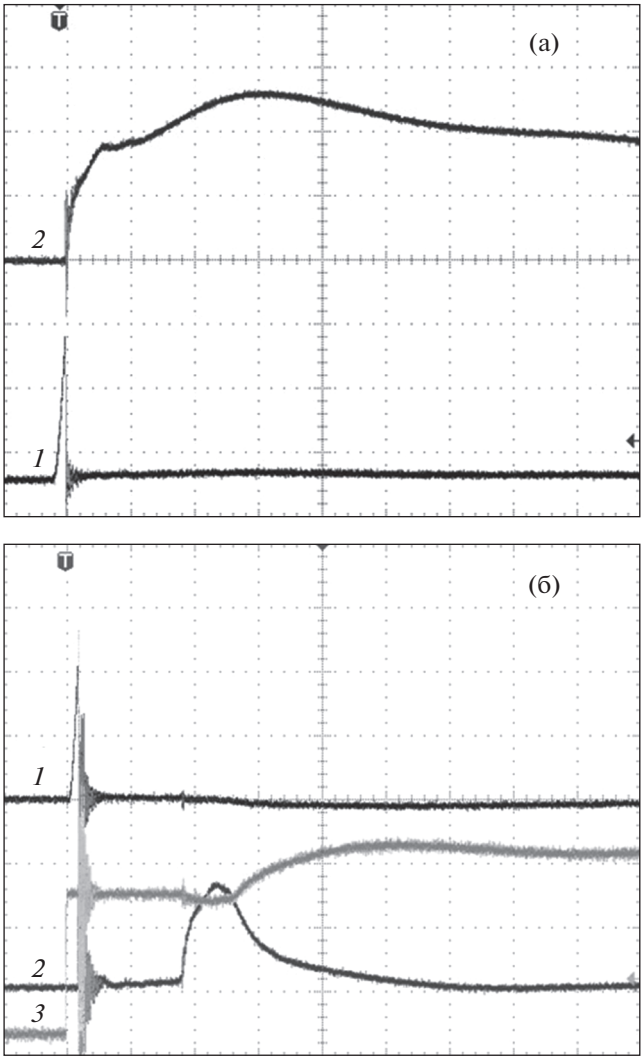

Рис. 4. Осциллограммы напряжения на промежутке катод–поджигающий электрод (*1*) и тока в промежутке катод–анод (*2*): **а** – разряд первого типа, **б** – разряд второго типа (*3* – сигнал с блока управления каналами регистрации). Масштаб по вертикали: *1* – 1 кВ/деление, *2* – 100 А/деление, *3* – 2 В/деление; по горизонтали – 2 мкс/деление.

цепи, представляющей собой формирующую линию с сосредоточенными параметрами, и составляет 30 мкс.

Регистрация напряжения в промежутке катод–поджигающий электрод осуществлялась с помощью низкоиндуктивного омического делителя. Ток в том же промежутке катод–поджигающий электрод определялся по падению напряжения на низкоиндуктивном сопротивлении 10 Ом, включенном в цепь поджига. Ток в промежутке катод–анод определялся по сигналу с калиброванного пояса Роговского.

Для изучения пространственной структуры и динамики разряда регистрировались изображения плазмы разряда в собственном оптическом излучении (далее “изображения разряда”) при временах экспозиции 5–500 нс. Средством получения изображений являлся электрооптический модуль, который состоял из двух блоков э.о.п., использующих схему стробирования по катоду (“отпирания” катода), блока управления каналами регистрации, светоделительного зеркала, 4-канального генератора задержанных импульсов (DG645) для синхронизации запуска каналов регистрации с поджигающим контуром разрядника и модуля сохранения изображений (ноутбук, программное обеспечение).

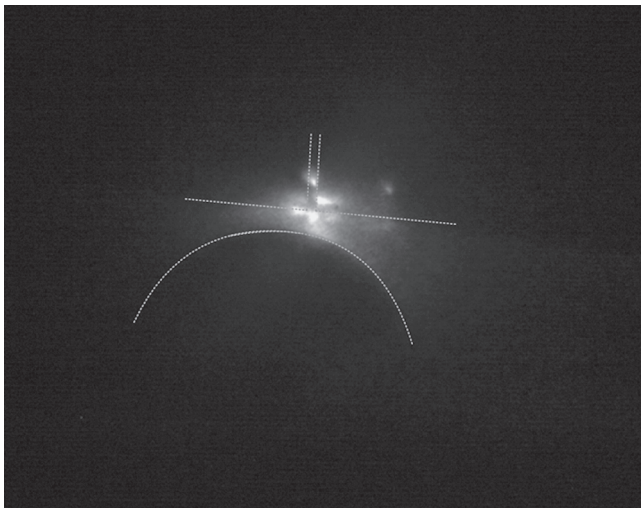

Рис. 5. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод–анод t = 7 мкс, продолжительность регистрации изображения Δt = 5 нс. Пунктирной линией отмечены контуры электродов и диэлектрической шайбы.

В свою очередь, каждый блок э.о.п., функциональная схема которого представлена на рис. 3, содержал блок генерации стробирующего импульса (г.с.и.) по фотокатоду (г.с.и. ”отпирает” фотокатод в заданном временном интервале), транспортирующий объектив (“Юпитер-3”) и э.о.п. (ЭПМ-102Г), к которому для считывания информации с его экрана через проекционный объектив “Вега-12Б” стыковалась цифровая п.з.с.-камера (п.з.с. – приборы с зарядовой связью) SDU-274 с разрешением 1600 × 1200 пикселей.

Для получения двух разделенных фиксированным временным интервалом кадров, регистрирующих с заданной экспозицией изображения излучающей в оптическом диапазоне плазмы в процессе развития разряда, каналы были размещены относительно наблюдаемого объекта по беспараллаксной схеме со светоделительным зеркалом.

Выбранная схема проведения испытаний позволяла в случае необходимости осуществлять

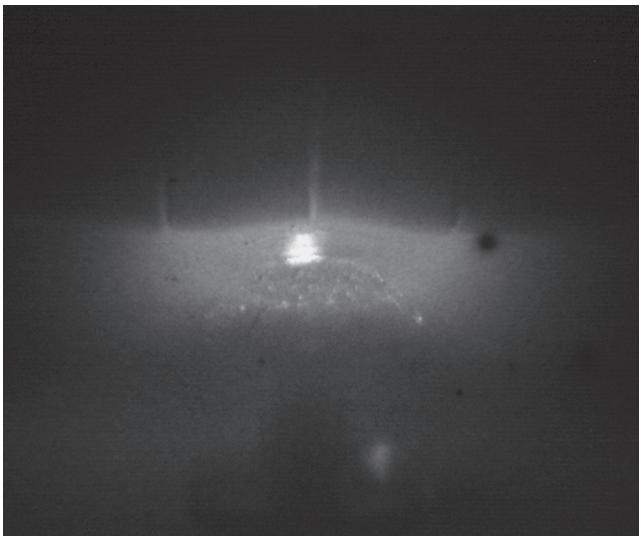

Рис. 6. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод–анод $t = 1.9$ мкс, продолжительность регистрации изображения $\Delta t = 500$ нс.

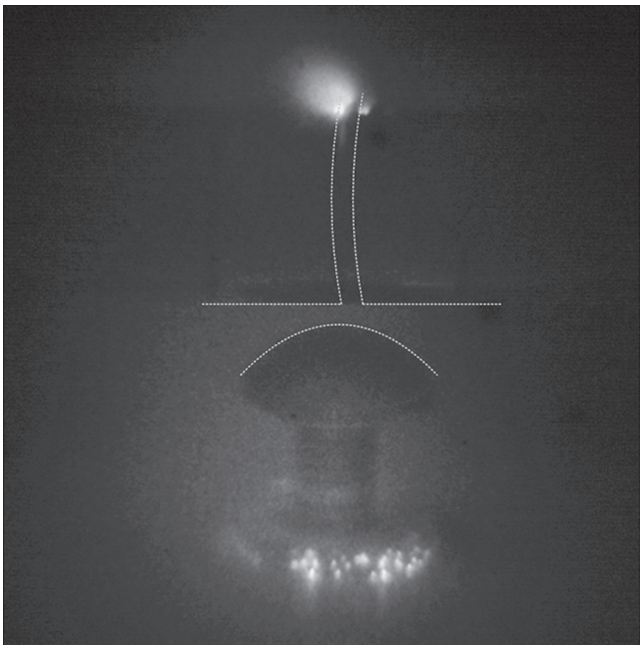

Рис. 7. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод–анод $t = 300$ нс, продолжительность регистрации изображения $\Delta t = 100$ нс. Пунктирной линией отмечены контуры электродов и диэлектрической шайбы.

синхронную регистрацию двух изображений с одного направления наблюдения и при этом путем соответствующего подбора усиления для каждого из э.о.п. акцентировать внимание на различных для каждого из изображений участках изучаемого объекта, т.е. повышать информативность изображений для выделенного момента времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. Характерные осциллограммы напряжения в системе поджига и тока в промежутке катод–анод для разрядов каждого типа приведены на рис. 4. При разряде первого типа осциллограммы тока проявляют полную повторяемость от разряда к разряду, при разряде второго типа устойчиво наблюдается укороченный импульс тока с затянутым спадом и временной задержкой, длительность которой варьируется в пределах от 2 до 10 мкс.

Разряд первого типа связан с развитием дугового разряда в промежутке катод–анод, т.е. токовый дрейф заряженных частиц в проводящей среде – плазме – проходит по кратчайшей траектории между катодом и анодом (рис. 5). Основной разряд первого типа возникает в том случае, когда вспомогательный искровой разряд по поверхности диэлектрика, который инициирует разряд между катодом и анодом, возникает на участке системы поджига, расположенном на минимальном расстоянии от поверхности анода. На рис. 5 запечатлена стадия дугового разряда в промежутке катод–анод, продолжительность регистрации изображения минимально возможная – $\Delta t = 5$ нс. Самые яркие наблюдаемые объекты – катодные пятна.

Гибкость применяемого инструмента исследований позволяет легко перестраивать систему регистрации изображений, например, увеличить продолжительность регистрации изображения на два порядка величины (рис. 6). При этом обнаруживаются детали пространственной структуры, которые в противном случае были бы неизбежно утеряны. На этот раз самым ярким объектом в разряде оказывается столб плазмы в промежутке катод–анод.

Вокруг точки в основании столба на катоде можно наблюдать область диффузного свечения в виде полушария (вероятно, результат воздействия излучения катодного пятна на остаточный газ), в пределах области диффузного свечения разряда на поверхности анода – множество анодных пятен и слой пара материала анода, который слегка приподнят над поверхностью анода. Место пробоя по поверхности диэлектрической шайбы не всегда локализовано со стороны анода. Если не предпринимать специальных мер, локализация пробоя носит достаточно случайный характер и может перемещаться по периметру диэлектрической шайбы. Пространственную привязку пробоя удается осуществить, например, нанесением с помощью карандаша с твердым хо-

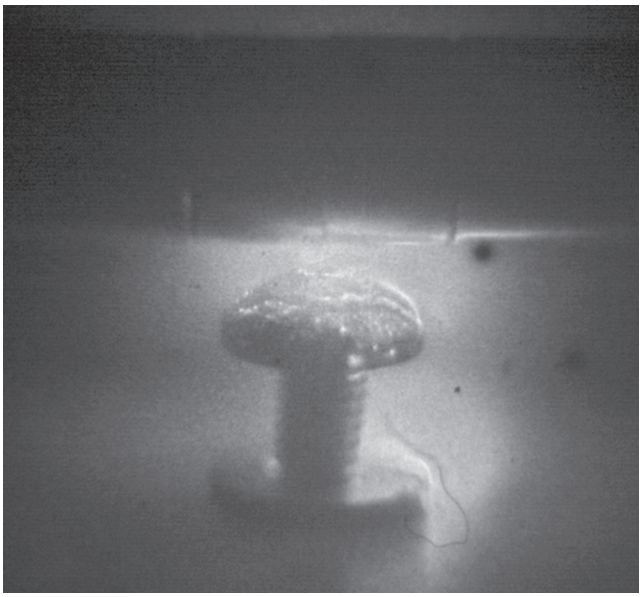

Рис. 8. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод–анод $t = 1.6$ мкс, продолжительность регистрации изображения $\Delta t = 100$ нс.

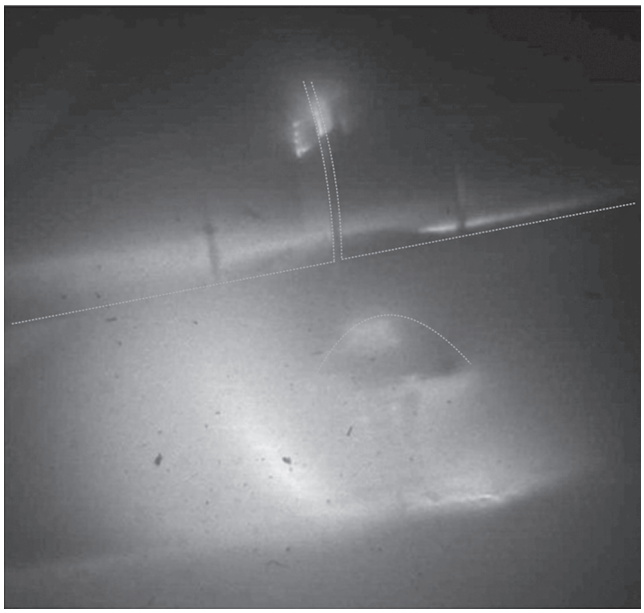

Рис. 9. Изображение разряда в оптическом диапазоне спектра. Экспозиция: начало регистрации изображения – время от начала протекания тока в промежутке катод–анод $t = 1.9$ мкс, продолжительность регистрации изображения $\Delta t = 100$ нс. Пунктирной линией отмечены контуры электродов и диэлектрической шайбы.

рошо заточенным грифелем тонкой полоски графита на боковую поверхность диэлектрической шайбы в месте желаемой локализации пробоя, инициирующего основной разряд в промежутке катод–анод.

Основной разряд второго типа возникает в том случае, когда вспомогательный искровой разряд возникает на участке поджигающей системы, находящемся на расстоянии от поверхности анода, близком к максимальному. Поверхность анода, находящаяся на расстоянии 1 мм от поверхности катода, в указанной ситуации в развитии разряда между катодом и анодом видимого участия не принимает, линии тока пересекают поверхность основания анода. Длина траектории, по которой проходит токовый дрейф заряженных частиц в этом случае, возрастает более чем на порядок величины.

На рис. 7, по-видимому, запечатлена искровая стадия разряда в промежутке катод–анод, если судить по величине тока и длительности интервала времени, в течение которого развивается разряд. Во всяком случае, это касается той части разряда, которую мы визуально можем наблюдать вблизи поверхности катода и поджигающего электрода. На поверхности катода на границе с диэлектрической шайбой наблюдаются катодное пятно и катодный факел, т.е. поток плазмы, эмитируемой из области катодного пятна. На поверхности поджигающего электрода также на границе с диэлектрической шайбой наблюдается анодное пятно. Кроме того, наблюдаются многочисленные анодные пятна на основании анода. Можно различить присутствие диффузного свечения в пространстве, окружающем катод и анод. В то же время визуальных признаков разряда непосредственно в промежутке катод–анод не наблюдается.

На рис. 8 запечатлен, вероятно, еще один вариант развития разряда второго типа. В промежутке катод–анод не наблюдаются яркие источники света: нет токово-плазменного шнура, отсутствуют катодные пятна, разряд носит объемный диффузный характер. Более яркое свечение у основания анода, на поверхности анода – дискретные анодные пятна, многие из них напоминают пузыри, возможно, что это сгустки пара материала анода. На снимке отсутствует изображение катодных пятен. По-видимому, они находятся с обратной от наблюдателя стороны катода.

Область токового дрейфа заряженных частиц, т.е. область межэлектродного пространства, в котором проходят в основном линии тока разряда второго типа на стадии, которую, судя по силе тока в разряде, можно назвать дуговой (по крайней мере, этот термин может быть применен к прикатодной области разряда), наиболее отчетливо зафиксирована на рис. 9. Наблюдаются катодное пятно и катодный факел, часто фиксируется анодное пятно на поверхности поджигающего электрода. В пространстве, окружающем электродную систе-

му, видно диффузное свечение, на фоне которого выделяется направленная к основанию анода дугообразная излучающая полоса. В то же время разряд в кратчайшем промежутке катод–анод не заметен, светящиеся анодные пятна у основания анода отсутствуют.

Можно предположить, основываясь на полученных результатах визуализации пространственной структуры свечения изучаемого разряда, следующее. Во-первых, ультрафиолетовое излучение в первую очередь катодного пятна, а также плазменного факела, образующихся при искровом разряде по поверхности диэлектрика, приводит к ионизации окружающего остаточного газа. Во-вторых, как следствие, в промежутке катод–анод в проводящей среде ионизованного остаточного газа загорается разряд типа тлеющего. Если искра по поверхности диэлектрика развивается достаточно близко к поверхности анода, то замыкание катодного факела на анод приводит к возникновению плазменного канала дугового разряда, т.е. формируется разряд первого типа.

В окружающем же пространстве продолжается под действием излучения из катодного пятна протекание разряда типа тлеющего. Свидетельством тому являются наблюдаемые в пределах обширной поверхности электрода, служащего анодом, локализованные анодные пятна. Как известно, тлеющий разряд подвержен действию ионизационно-перегревной неустойчивости, которая приводит к контракции токового канала [5, 6], что и становится причиной возникновения локализованных анодных пятен.

Второй тип разряда отличается от первого тем, что, во-первых, существующие в нем две токопроводящие области включены в электрическую цепь последовательно. Во-вторых, контракция токовых каналов в области с низкой плотностью вещества фиксируется только на начальной, по-видимому, искровой стадии разряда. В дальнейшем существование отдельных анодных пятен (на основании анода), как следов контракции токовых каналов, не наблюдается. Однако периферийная в основном область с низкой плотностью вещества по-прежнему формируется опять-таки под воздействием излучения, испущенного из области с высокой плотностью вещества – катодного пятна и плазменного факела, прилегающей к катоду, и по-прежнему проявляет схожесть с тлеющим разрядом, а именно, способом формирования токового канала. Известно, что если расстояние между катодом и анодом меньше, чем нужно, чтобы на нем поместилось темное катодное пространство и начало тлеющего свечения, но вместе с тем в окружающем пространстве можно найти более длинный путь от катода к аноду, то тлеющий разряд выбирает этот более длинный путь для формирования канала тока [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучалась динамика процесса коммутации короткого вакуумного промежутка с помощью вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика. Для этого была осуществлена регистрация изображений плазмы разряда в собственном оптическом излучении при временах экспозиции 5–500 нс.

Средством получения изображений являлся двухканальный электрооптический модуль. Каждый канал содержал блок генерации стробирующего импульса по фотокатоду э.о.п., транспортирующий объектив, э.о.п., к которому для считывания информации с его экрана через проекционный объектив стыковалась цифровая п.з.с.-камера.

Для получения двух кадров, регистрирующих с одного направления с заданной экспозицией два изображения излучающей в оптическом диапазоне плазмы в процессе развития разряда, каналы были размещены относительно наблюдаемого объекта по беспараллаксной схеме со светоделительным зеркалом.

Выбранная схема проведения испытаний позволяла в случае необходимости осуществлять синхронную регистрацию двух изображений с одного направления наблюдения и при этом путем соответствующего подбора усиления для каждого из э.о.п. акцентировать внимание на различных для каждого из изображений участках изучаемого объекта, т.е. повышать информативность изображений для выделенного момента времени.

Благодаря использованию представленной системы регистрации оптических изображений удалось зафиксировать ранее не описанные особенности развития дугового разряда в вакууме.

Наблюдаемые разряды можно разделить на два типа. Первый тип связан с развитием дугового разряда в промежутке катод–анод, т.е. токовый дрейф заряженных частиц в проводящей среде – плазме – происходит по кратчайшей траектории между катодом и анодом. Параллельно каналу дугового разряда наблюдается канал диффузного разряда. Второй тип разряда характеризуется образованием катодного пятна (пятен) на катоде, выбросом в окружающее пространство плазменного факела, продолжением которого является дугообразная диффузная область разряда, замыкающаяся на основание анода, но при этом визуальных признаков развития разряда по наиболее короткой траектории в промежутке катод–анод не наблюдается.

На основе анализа полученных экспериментальных данных высказано предположение о существенной роли излучения катодного пятна и катодного факела в процессе формирования токового канала в разряде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долгов А.Н., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е.* // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 242.
2. *Долгов А.Н., Прохорович Д.Е.* // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16. Вып. 2. С. 558.
3. *Лебедев Ю.А., Мавлюдов Т.Б., Шахатов В.А., Эпштейн И.Л., Карпов М.А.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 2. С. 201.
4. *Долгов А.Н., Клячин Н.А., Прохорович Д.Е.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 4. С. 627. https://doi.org/10.21883/JTF.2017.04.44328.1968
5. *Райзер Ю.П.* Физика газового раряда. М.: Наука, 1992.
6. *Велихов Е.П., Ковалев А.С., Рахманов А.Т.* Физические явления в газоразрядной плазме. М.: Наука, 1987.
7. *Капцов Н.А.* Электроника. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1954.