

УДК 553.9

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ ПЛАЗМЫ В АРГОНЕ ПРИ НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ И В СЛАБОМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2024 г. Ю. С. Акишев^{a,b,*}, В. П. Бахтин^a, А. Б. Булейко^a, О. Т. Лоза^a,
А. В. Петряков^a, А. А. Раваев^a, Е. А. Фефелова^a

^a Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Россия

^b Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

* e-mail: akishev@triniti.ru

Поступила в редакцию 31.10.2023 г.

После доработки 24.11.2023 г.

Принята к публикации 01.12.2023 г.

Изложены результаты экспериментальных исследований формирования и последующей эволюции протяженной ($l = 300$ мм) и тонкостенной ($\Delta r \approx 10$ мм) трубчатой ($2r \approx 110$ мм) плазмы в слабом продольном магнитном поле ($B = 175$ Гс) без использования термоэмиссионного катода. Цилиндрическая камера, в которой формировалась трубчатая плазма, прокачивалась аргоном высокой чистоты (99.998%) со скоростью около 1 м/с при давлении $P = 10^{-3} - 10^{-2}$ Торр. Установлено различие в динамике пробоя, завершающегося формированием трубчатого разряда, при двух способах создания затравочных электронов, инициирующих развитие ионизационных лавин. В первом из них импульсный разряд, предшествующий подаче высокого напряжения основного разряда, создавал предыонизацию в небольшой области вокруг секционированных катодов. Во втором способе затравочные электроны создавались во всей рабочей зоне разрядной камеры ВЧ-разрядом с частотой 85 кГц и длительностью около одной секунды. Высокоскоростная съемка 4-кадровой ICCD-камерой позволила установить динамику формирования разряда на всех его стадиях. Проведены измерения продольного и радиального тока разряда. Полученные результаты показали возможность пространственной изоляции протяженной трубчатой плазмы от металлической стенки разрядной камеры путем использования слабого магнитного поля.

Ключевые слова: газ низкого давления, трубчатая плазма, предыонизация, затравочные электроны, плазменный шнур, продольное магнитное поле

DOI: 10.31857/S0367292124020084, EDN: QVCWZL

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется интерес к источникам СВЧ-излучения на основе плазменного мазера. Плазменный мазер — это устройство, в котором СВЧ-излучение возникает в результате черенковского взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с протяженной плазмой, создаваемой в разреженном инертном газе при давлении $P = 10^{-2} - 10^{-3}$ Торр [1].

Наиболее распространены плазменные мазеры коаксиального типа, в которых как электронный пучок, так и плазма имеют трубчатую форму [2–5]. Для формирования трубчатой плазмы применяется термоэмиссионный катод [2–4]. В качестве материала термокатада обычно используется торированный вольфрам. При подаче на накаливаемый катод отрицательного импульса напряжения термоэмиссионные электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют рабочий газ в разрядной камере.

Этот процесс проходит в сильном продольном магнитном поле, которое удерживает плазму от контакта с близкорасположенной металлической стенкой. Толщина и радиус сформированного плазменного цилиндра определяются размерами термокатада и величиной магнитного поля. При этом термокатод работает не только как эмиттер затравочных электронов, инициирующих в газе волну ионизации, распространяющуюся от катода к аноду, но также и как катод, на который собирается большой ток ионов из созданной разрядом плазмы. В таком случае у поверхности термокатада формируется катодный слой, в котором положительные ионы, поступающие из плазмы, начинают играть главенствующую роль.

Во-первых, они нейтрализуют объемный заряд электронов вблизи эмиссионного катода и тем самым устраняют его токовый режим с вольт-амперной характеристикой, соответствующей закону Чайлда–Ленгмюра (закон “3/2”).

Во-вторых, ионы, ускоренные в катодном слое, оказывают сильное энергетическое воздействие на катод, которое модифицирует его поверхность. Результатом ионной модификации может быть изменение микроструктуры тонкого поверхностного слоя катода, приводящее к увеличению работы выхода катода и уменьшению его эмиссионной способности, что и наблюдается в экспериментах.

Кроме того, при разрядных токах на катод более нескольких ампер на его поверхности могут образоваться пред-дуговые [6] или дуговые [7] катодные пятна с очень высокой плотностью тока (10^6 А/см² и более). Высокий уровень локального энерговыделения в катодных пятнах создает высокие локальные температуры на поверхности катода, которые приводят к модификации термокатада уже на всю его толщину.

В результате термической реструктуризации материала катода происходит его охрупчивание, особенно губительное для тонких проволочных или фольговых термокатодов. Охрупчивание сильно уменьшает механическую прочность термокатада и приводит к полному его разрушению даже от слабых внешних толчков.

В силу указанных причин разработка методов создания трубчатой плазмы без применения термокатада является актуальной, но и сложной задачей. Ее сложность обусловлена требованием создать протяженную плазму вблизи металлической стенки с использованием слабого магнитного поля, которое в несколько десятков раз меньше обычно используемого в плазменных мазерах.

К настоящему времени разработаны различные плазменные устройства, стабильность пробоя и формирование плазмы в которых основаны на применении предыонизации газа вспомогательным поверхностным или объемным разрядом. Как правило, вспомогательные разряды создают затравочные электроны вблизи катода [8].

В данной статье изложены результаты экспериментальных исследований по динамике формирования и последующей эволюции протяженной ($l = 30$ см) и тонкостенной ($\Delta r \approx 1$ см) трубчатой плазмы вблизи металлической стенки в слабом продольном магнитном поле ($B = 175$ Гс) без использования термоэмиссионного катода, но с использованием локальной (вблизи катодов) и глобальной (во всем объеме газоразрядной камеры) предыонизацией.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование особенностей формирования трубчатой плазмы без использования термоэмиссионного катода проводилось на стенде, включающем в себя газоразрядную камеру (ГРК), а также необходимое оборудование, обеспечивающее формирование вспомогательного и основного разряда и диагностику созданной трубчатой плазмы. Эскиз ГРК представлен на рис. 1.

В качестве рабочего газа использовался аргон высокой чистоты. Перед каждым экспериментом ГРК откачивалась до давления $P = 10^{-5}$ Торр. Газоразрядная камера помещена внутрь шести катушек Гельмгольца, создающих слабое продольное магнитное поле. Ток, пропускаемый через катушки, определяет величину магнитной индукции. Эксперименты

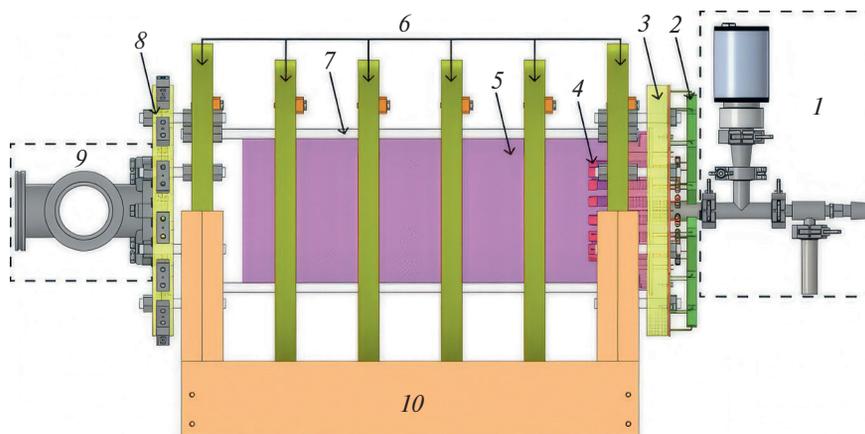


Рис. 1. Эскиз ГРК с катушками Гельмгольца (вид сбоку). 1 – система напуска газа; 2 – катодные балластные сопротивления R ; 3 – катодный торцевой фланец, на котором смонтирован секционированный катод из 16 отдельных катодов; 4 – катод и вспомогательный анод; 5 – тонкая металлическая сетка внутри кварцевой трубы, вплотную прижатая к ее внутренней стенке; 6 – катушки Гельмгольца, создающие продольное магнитное поле с индукцией 175 Гс; 7 – кварцевая труба диаметром 200 мм, внутри которой смонтирована система электродов для создания трубчатой плазмы; 8 – анодный торцевой фланец; 9 – крест ISO63 для соединения с вакуумной системой; 10 – ложемент для крепления ГРК и катушек Гельмгольца.

проводились при величине магнитной индукции, равной 175 Гс. Измерения магнитной индукции показали, что магнитное поле достаточно однородно как вдоль, так и поперек разряда. Индукция измерялась датчиком Холла Honeywell SS494В с чувствительностью 5 мВ/Гс и с размерами $3 \times 4 \times 1$ мм³.

Основой ГРК является длинная кварцевая труба ($L = 600$ мм) с толщиной стенки 4 мм и с внутренним диаметром 192 мм, внутри которой смонтирована система электродов для создания трубчатой плазмы. Катод источника плазмы секционирован и состоит из нескольких катодных элементов, равномерно размещенных по окружности диаметром 110 мм. Число катодных элементов определяется необходимой степенью однородности плазмы в азимутальном направлении.

Конструкция ГРК позволяла изменять число катодных элементов и увеличивать их количество вплоть до 16. Каждый катодный элемент подключался к источнику высокого напряжения (конденсатор емкостью $C = 5$ мкФ) через индивидуальное балластное сопротивление R , от величины которого зависел ток основного разряда. Длительность тока определялась величиной RC . Схема подключения катодов обеспечивала также зажигание вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика вокруг каждого катодного элемента.

Анод (коллектор тока) состоит также из набора анодных элементов, равномерно размещенных по окружности диаметром 110 мм и расположенных строго напротив катодных элементов. Анодные элементы закорочены друг с другом и соединены с землей через токовый шунт. Расстояние между секционированным катодом и коллектором тока было выбрано равным 30 см, но конструкция системы позволяла изменять эту величину.

Вплотную к внутренней стенке кварцевой трубы помещена тонкая и прозрачная металлическая сетка, имитирующая сплошную металлическую стенку разрядной камеры. Мотивация к использованию сетки состояла в том, что до настоящего времени в литературе отсутствует информация о структуре трубчатой плазмы внутри плазменного мазера как в процессе ее формирования, так и в процессе дальнейшего поддержания плазмы разрядным током.

Причина такой ситуации в том, что для генерации интенсивного СВЧ-излучения металлический корпус плазменного мазера не должен иметь каких-либо отверстий, сквозь которые можно было бы наблюдать за созданной плазмой, поскольку наличие отверстий может привести к существенному изменению условий генерации и модовой структуры выходного излучения.

В нашем случае ячейки тонкой сетки были размером 0.8×0.8 мм², так что сетка имела геометрическую

прозрачность не менее 70%. Такая прозрачность вполне достаточна, чтобы регистрировать с помощью быстрой оптической камеры трехмерную динамику формирования трубчатой плазмы при наложении высоковольтного импульса напряжения на катодные элементы и дальнейшей эволюции ее структуры при разных параметрах эксперимента.

Неоднородность электрического поля, обусловленная ячейистой структурой сетки, распространяется от сетки не далее размера ее ячейки. В условиях эксперимента характерное расстояние от сетки до трубчатой плазмы намного превышало размер ячейки. В таком случае можно утверждать, что мелкоячейчатая сетка достаточно хорошо имитировала сплошную металлическую стенку мазера. Кроме того, сетка могла быть либо накоротко соединена с анодным блоком, либо отдельно от него соединена с землей через токовый шунт. Такая схема давала возможность независимо измерять токи, собираемые сеткой и коллектором, и делать заключение о степени магнитной изоляции трубчатой плазмы от металлической стенки мазера.

Эксперименты по формированию трубчатой плазмы выполнены с использованием двух способов предыонизации, создающих затравочные электроны непосредственно перед подачей импульса высокого напряжения основного разряда. Первый способ является локальным, так как он создавал вспомогательным импульсным разрядом предыонизирующую плазму, локализованную только вокруг каждого катода на площади не более 1 см². Длительность вспомогательного разряда не превышала 0.1 мкс. Второй способ является нелокальным, так как он создавал вспомогательным ВЧ-разрядом предыонизирующую плазму во всей рабочей зоне ГРК. Использовался ВЧ-разряд с частотой 85 кГц, амплитудой напряжения не более 2 кВ. Высоковольтный импульс основного разряда подавался примерно через 1 с после включения ВЧ-генератора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Формирование трубчатой плазмы при создании затравочных электронов вспомогательным импульсным разрядом вдоль поверхности диэлектрика

Вначале было проведено исследование формирования разряда с одним элементом многосекционного катода. Установлено, что зажигание отдельного плазменного шнура вдоль магнитного поля происходит достаточно быстро — через 5—6 мкс после возникновения вспомогательного разряда вокруг выделенного элемента. Однако сам вспомогательный разряд возникает не сразу, но с задержкой после наложения на катодный элемент высокого напряжения, причем существует заметный разброс по длительности задержки при фиксированных параметрах эксперимента.

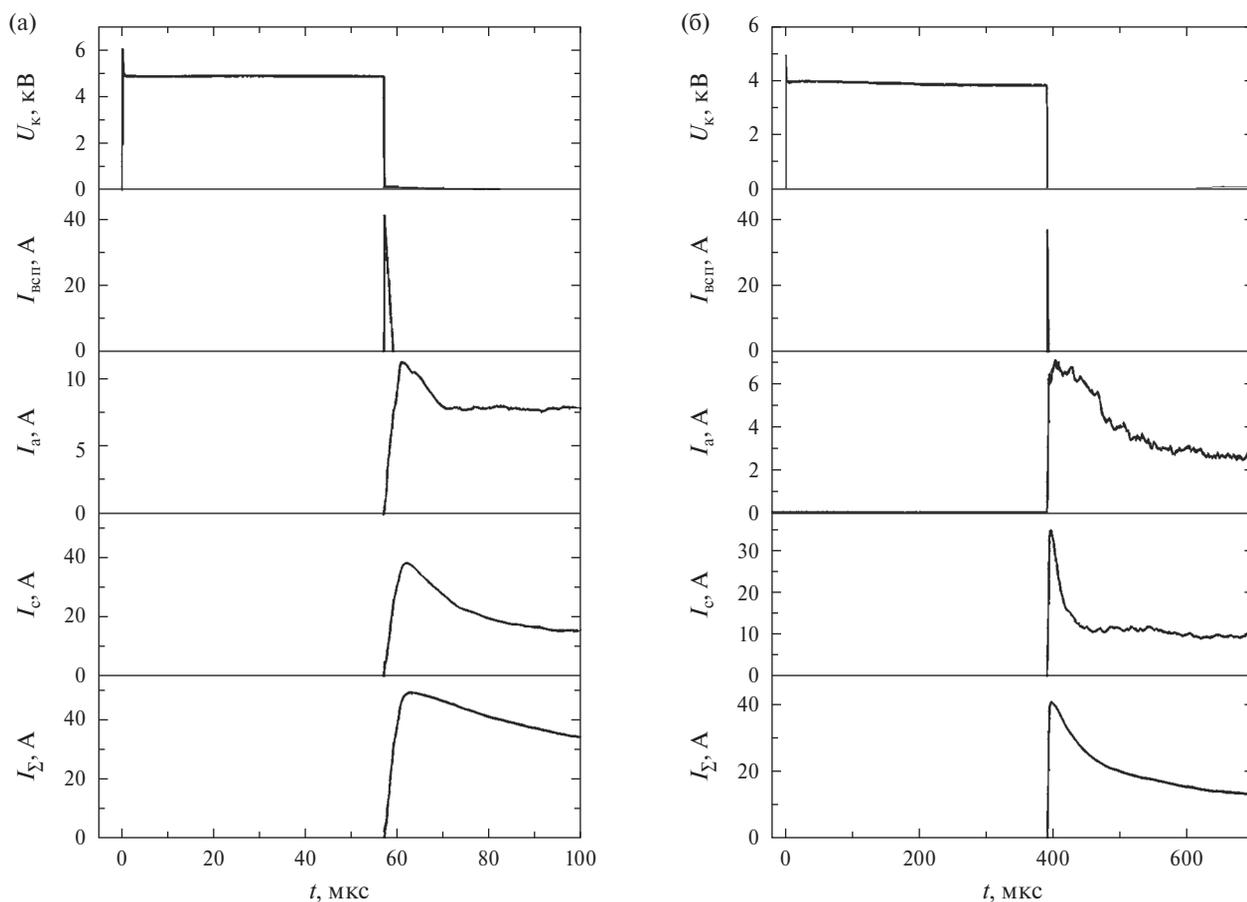


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжения на катоде U_k и тока вспомогательного разряда $I_{всп}$, тока анода I_a , тока на сетку I_c и суммарного тока $I_{\Sigma} = I_a + I_c$ при развитии одиночного токового шнура; а) конденсатор C заряжен до 5 кВ; б) конденсатор C заряжен до 4 кВ. Давление аргона $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр.

Набор типичных осциллограмм напряжения на катоде U_k , тока вспомогательного поверхностного разряда $I_{всп}$ и токов на сетку I_c (радиальный ток, перпендикулярный магнитному полю) и коллектор (анод) I_a (продольный ток, параллельный магнитному полю) приведен на рис. 2.

Амплитуда прикладываемого напряжения и давление аргона в ГРК были равны $U = 5$ кВ и $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр соответственно. Из приведенных данных видно, что при одних и тех же условиях эксперимента существует разброс по временам задержки в появлении вспомогательного разряда.

Анализ всего массива экспериментальных данных показал, что задержка и ее разброс по длительности в среднем увеличиваются с уменьшением давления газа и амплитуды прикладываемого напряжения. При этом в некоторых случаях задержки были очень значительные. Так, при давлении $P = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр и $U = 5$ кВ задержка в появлении вспомогательного разряда иногда могла достигать нескольких миллисекунд, а при этом же давлении и меньшем напряжении $U = 3.5$ кВ зафиксирована задержка в несколько десятков миллисекунд.

На осциллограмме рис. 2а видно, что ток I_a , собираемый коллектором, начинает резко нарастать сразу же после появления вспомогательного поверхностного разряда вокруг катода. Последующий спад коллекторного тока обусловлен спадом напряжения на разряжающемся конденсаторе $C = 5$ мкФ. При необходимости, увеличением емкости этого конденсатора спад тока можно замедлить.

При подключении к источнику напряжения большего количества катодов статистика, характеризующая возникновение вспомогательного разряда на катодах, существенно меняется. То, что вспомогательные разряды не возникают одновременно на всех подключенных катодах, было вполне ожидаемо.

Неожиданным оказалось другое обстоятельство: среднее время задержки спонтанного возникновения самого первого вспомогательного разряда на одном из коллективно подключенных катодов заметно уменьшается по сравнению с задержкой возникновения разряда на том же самом катоде, если он был подключен только один. При коллективном подключении катодов заметно уменьшается

и разброс по длительности задержки возникновения разряда на каждом из катодов. При одновременном подключении всех катодов среднее время задержки на каждом катоде находилось в диапазоне 55 ± 35 мкс, что резко контрастирует с задержками в несколько миллисекунд или даже десятков миллисекунд, характерных для одиночно подключаемых катодов.

Следующая особенность состояла в том, что после спонтанного возникновения самого первого вспомогательного поверхностного разряда вокруг одного из катодов происходило быстрое возникновение поверхностных разрядов вокруг соседних катодов.

Таким образом, спонтанный поверхностный пробой на одном из катодов дистанционно инициировал поверхностный пробой вокруг соседних катодов. В свою очередь другие электроды инициировали пробой у своих соседей и далее, этот процесс приводил к быстрому возникновению вспомогательных разрядов на всех катодах.

Характерное время распространения волны такого индуцированного поверхностного пробоя составляло всего несколько микросекунд. При этом вполне ожидаемо оказалось, что для возникновения этого эффекта большое значение имеет расстояние между катодами, подключенными к высокому напряжению.

Если катоды подключались через один или два, т.е. подключенные катоды дальше располагались друг

от друга, то время возникновения индуцированного пробоя увеличивалось, и при больших расстояниях между подключенными катодами эффект инициирования пробоя исчезал. Этот эффект также сильно ослабевал при уменьшении тока, приходящегося на катодный элемент.

Иллюстрацией к сказанному является рис. 3, на котором представлены осциллограммы токов и напряжений с четырех катодов для двух комбинаций их подключения. Рисунок 3а — подключены четыре соседних друг с другом катода (расстояние между их центрами 21 мм), рис. 3б — подключены также четыре катода, но через два не подключенных к высокому напряжению (в этом случае расстояние между центрами подключенных катодов 63 мм).

Как видно на рис. 3а, задержка спонтанного возникновения поверхностного разряда на первом сработавшем катоде составляет 21 мкс после подачи на катоды высоковольтного импульса. В течение последующих 4 мкс происходит инициированный поверхностный пробой вокруг остальных катодов. Те же самые величины для второго варианта подключения четырех катодов (рис. 3б) равны 87 мкс и 8 мкс соответственно.

Высокоскоростная съемка процесса подтвердила эти измерения: время, необходимое для формирования плазменного цилиндра при подключении даже максимального для данной конструкции числа катодных

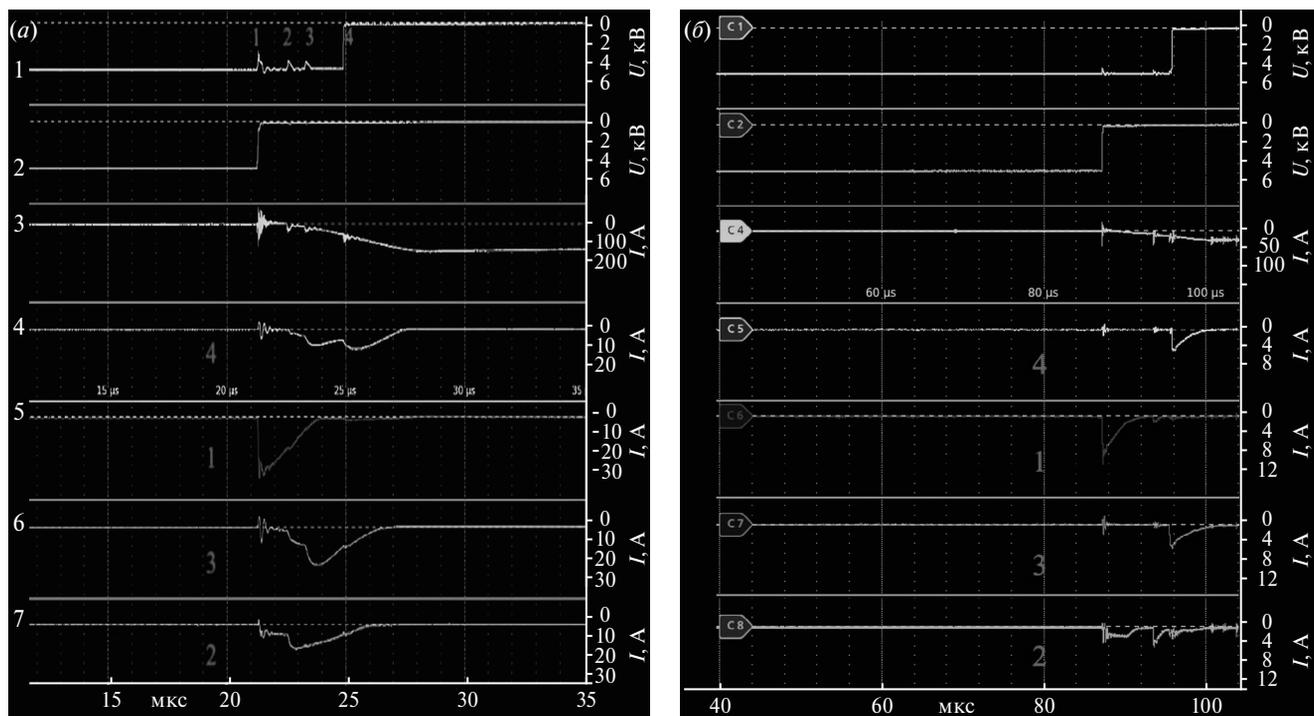


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при подключении четырех соседних катодов. 1-й и 2-й лучи — осциллограммы напряжений на четвертом и первом катодах (нумерация катодов — по времени их пробоя), 3-й луч — ток коллектора, 4-й — 7-й лучи — токи вспомогательных разрядов 4-го, 1-го, 3-го и 2-го катодов.

элементов доходило до 90 мкс. После формирования протяженной трубчатой плазмы падение напряжения вдоль всего плазменного цилиндра оказывается небольшим ($U \approx 100 \pm 20$ В). В качестве заключения к данному разделу отметим, что первый способ создания предыонизации обеспечивал формирование трубчатой плазмы при давлениях аргона в диапазоне $3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-3}$ Торр и амплитудах приложенного напряжения от 3 до 5 кВ, но с задержкой от 20 до 90 мкс.

3.2. Формирование трубчатой плазмы при создании затравочных электронов вспомогательным высокочастотным разрядом во всем объеме ГРК

Во втором (нелокальном) способе создания затравочных электронов ВЧ-напряжение подавалось либо на отдельно выбранный катод, либо на все катоды одновременно. Амплитуда ВЧ-напряжения выбиралась из условия, чтобы, с одной стороны, это напряжение обеспечивало создание затравочной плазмы низкой

концентрации, а с другой стороны, амплитуда не должна быть высокой, чтобы не создавать преждевременного пробоя между катодом и анодом.

3.2.1 Динамика азимутальной структуры одиночного плазменного шнура.

Исследования формирования трубчатой плазмы при ВЧ-предыонизации также начинались с изучения формирования одиночного плазменного шнура. Помимо регистрации напряжения на катод и разрядных токов, в каждом эксперименте осуществлялась высокоскоростная фоторегистрация процесса с фиксацией событий во всем объеме ГРК. Эта регистрация велась в направлении, перпендикулярном оси газоразрядной системы. Для исследования динамики азимутальной структуры плазменного шнура выбирался катод, лежащий в горизонтальной плоскости с осью разрядной камеры.

На рис. 4а даны пять последовательных кадров с изображениями плазменного шнура в процессе его развития за время $\Delta t \approx 0.1$ мкс, за которое суммарный ток разряда нарастает от нуля до максимальной величины

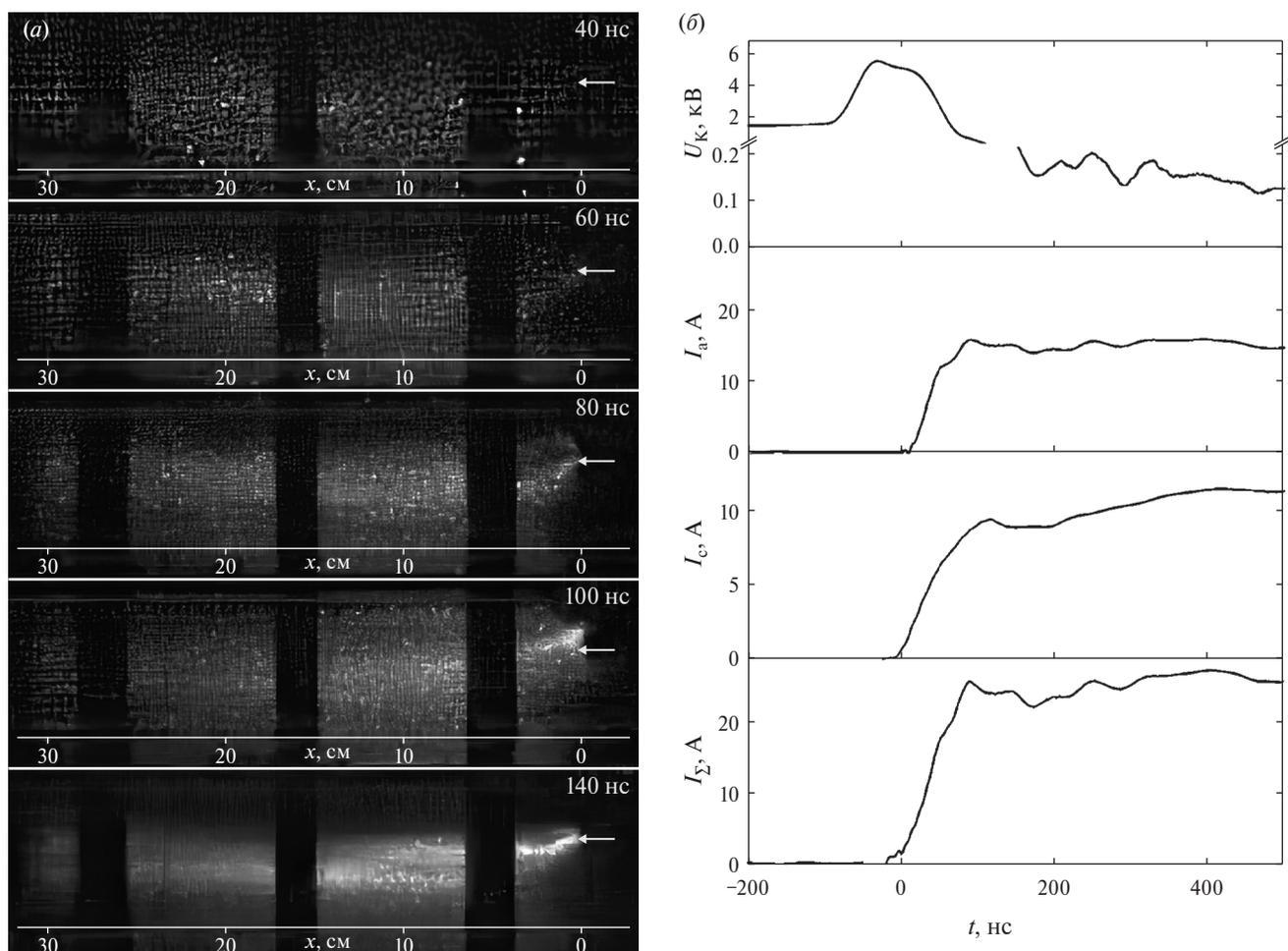


Рис. 4. а) Пять последовательных изображений плазменного шнура в процессе его развития за промежутки $\Delta t \approx 100$ нс. Темные вертикальные полосы на кадрах – катушки Гельмгольца; желтые стрелки показывают положение катода; б) осциллограммы напряжения на катод U_k , токов на сетку I_c , анод I_a , и суммарного тока $I_\Sigma = I_c + I_a$.

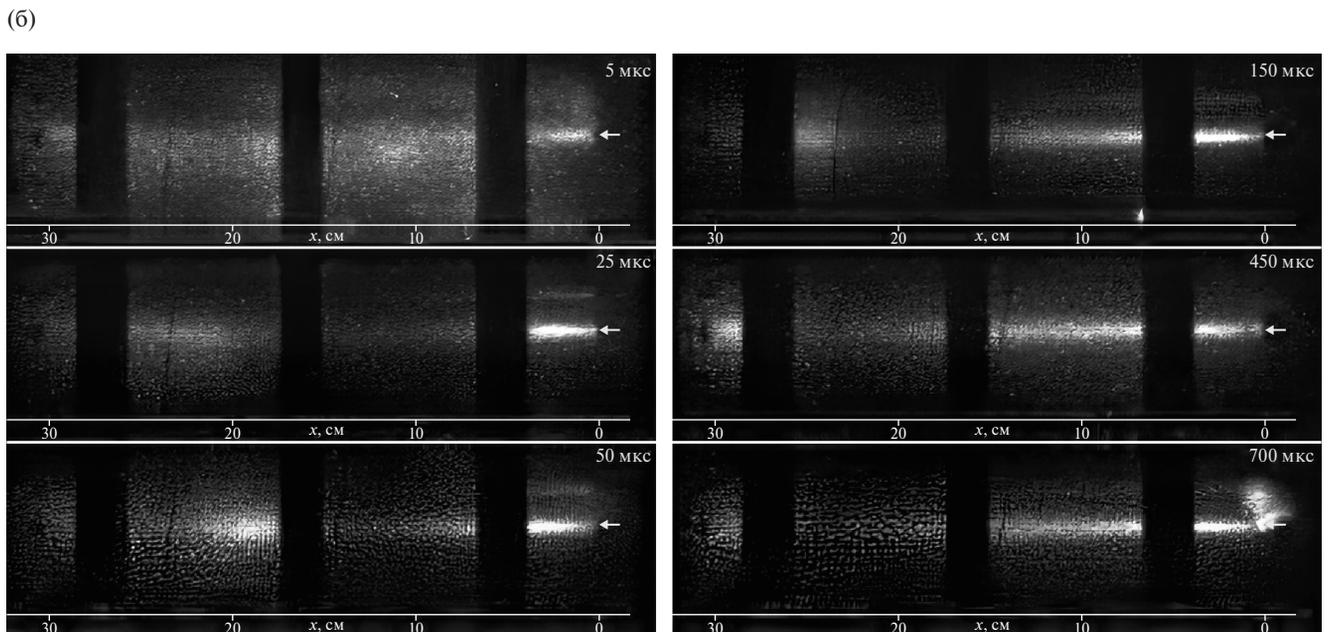
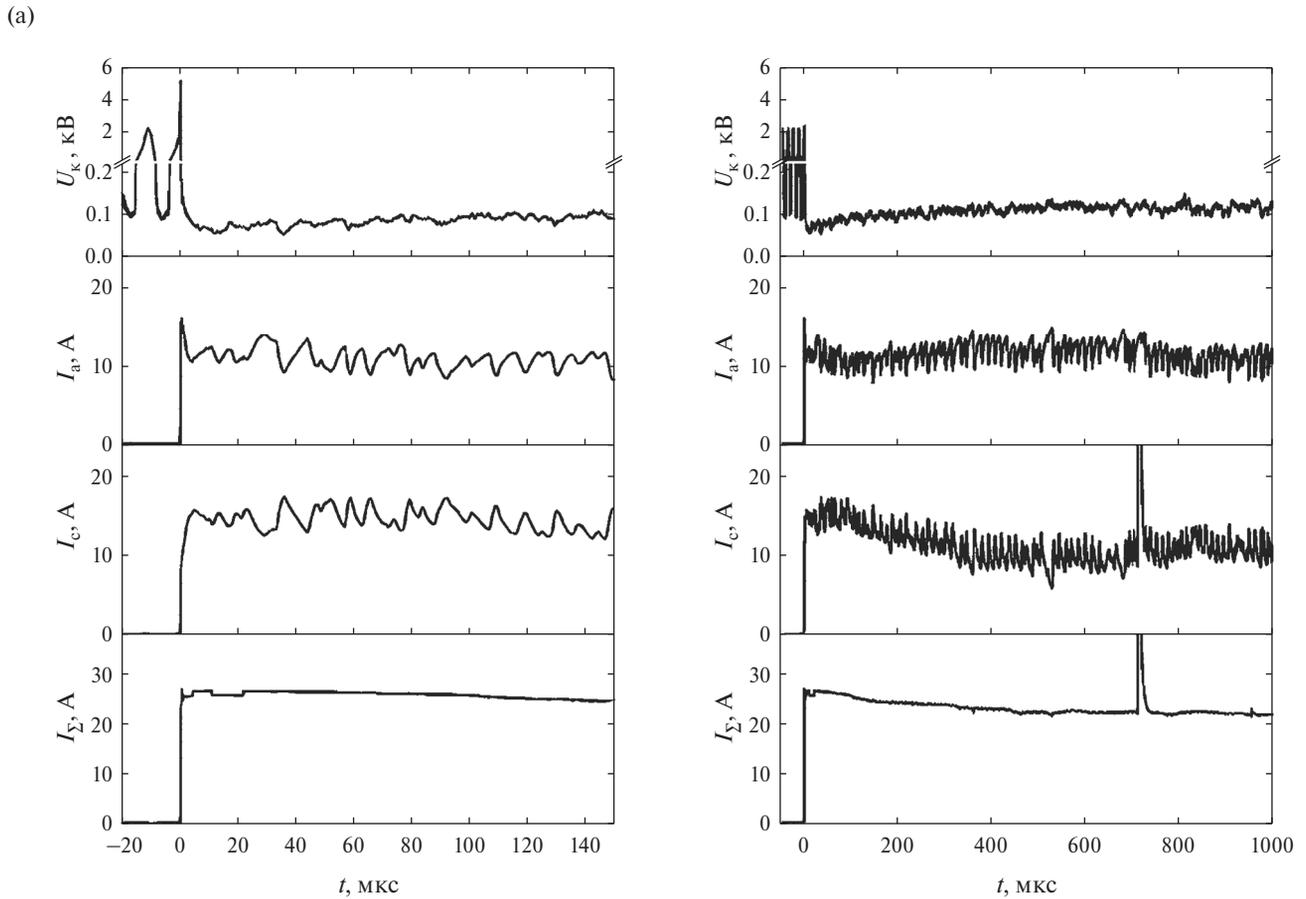


Рис. 5. а) Осциллограммы напряжения на катоде U_k и токов I_c и I_a на коротких и длинных временах при формировании одиночного плазменного шнура; б) изображения плазменного шнура на послепробойной стадии для шести моментов. Желтая стрелка показывает положение катода.

($I_{\max} \approx 25$ А). Как видно, плазменный шнур, “привязанный” к выбранному катодному элементу, смещается относительно горизонтальной линии “катод–анод”, что обусловлено совместным действием электрического ВЧ-поля и продольного магнитного поля, несмотря на их относительно небольшие величины. Заметим, что ярко выраженного фронта ионизационной волны, направленной к аноду и формирующей высокую проводимость в плазменном шнуре, на кадре нет. Фронт (если его можно так назвать) сильно растянут и размыт в продольном направлении, так что фактически проводимость шнура формируется практически сразу по всей его длине, но с разной интенсивностью. При этом в азимутальном направлении токовый шнур при достижении максимума тока все еще не полностью контрагирован и выглядит диффузным и широким, что, возможно, обусловлено большим размером области, в которой была создана начальная ВЧ-предыонизация.

На рисунке 4б представлены осциллограммы напряжения U_k на выбранном катоде, токов на сетку I_c и на коллектор (анод) I_a и суммарного тока $I_{\Sigma} = I_c + I_a$ в процессе формирования одиночного плазменного шнура. Высоковольтный импульс напряжения подавался на катод в момент максимума предыонизирующего ВЧ-напряжения, равного примерно 1.5 кВ. Поэтому напряжение на осциллограмме $U_k(t)$, существующее до начала пробоя, является напряжением ВЧ-генератора. Ноль времени ($t = 0$) на осциллограмме соответствует началу роста напряжения на катоде, связанному с возникновением пробоя.

Как видно на рис. 4б, развитие шнура сопровождается ростом тока не только на анод, но и на сетку. После пробоя средние токи на анод и сетку устанавливаются примерно на уровне 10 и 15 А, соответственно, причем их суммарный ток остается практически постоянным во времени (см. рис. 5а).

Медленный спад суммарного тока с 25 до 20 А за время порядка 1 мс обусловлен разрядом питающего конденсатора C . Запись осциллограмм токов на анод I_a и сетку I_c с разрешением во времени не хуже 1 мкс показала, что эти токи испытывают резкие и почти регулярные противофазные колебания, особенно заметные на больших временах после пробоя. Эти колебания характеризуются небольшой амплитудой около $3 \div 5$ А и квазипериодом около 10 мкс (см. рис. 5а).

Противофазность токов I_a и I_c свидетельствует, что разряд, сформировавший высокопроводящий плазменный шнур, функционирует в режиме заданного тока, определяемого балластным сопротивлением внешней цепи, поскольку сопротивление плазменного шнура мало.

Медленная эволюция плазменного шнура на больших временах показана на рис. 5б. Как видно, после завершения пробоя у катода формируется

контрагированный плазменный шнур. Этот шнур уже выпрямился по сравнению с его исходной конфигурацией (см. рис. 4а при $t = 140$ нс) и сориентировался точно вдоль горизонтальной линии катод–анод. К моменту $t = 5$ мкс вокруг плазменного шнура у катода и во всей остальной области все еще сохраняется диффузная плазма, созданная предыонизацией.

Далее происходит исчезновение диффузной плазмы, сопровождаемое быстрым удлинением плазменного шнура от катода, и медленным встречным движением более широкой плазмы от анода. После того, как передний фронт плазменного шнура от катода встретится с плазмой от анода, катодный шнур начинает выталкивать ее обратно к аноду.

Процесс завершается примерно через 600 мкс с начала развития разряда, когда передний фронт катодного шнура приблизится к аноду, но небольшая область у анода с широкой и ярко светящейся плазмой сохранится. После этого структура и динамика плазменного шнура практически не изменяются во времени. При этом практически на всей длине плазменного шнура его поперечный размер оказывается больше расстояния между соседними катодами. Это дает уверенность, что при подключении всего набора катодных элементов аксиальная неоднородность плазменного цилиндра будет минимальной.

3.2.2 Динамика радиальной структуры одиночного плазменного шнура. Для исследования этого процесса выбирался катод, лежащий в вертикальной плоскости с осью разрядной камеры. Как видно на рис. 6а, после 100 нс формируется четко выраженный длинный плазменный шнур, параллельный металлической сетке и находящийся от нее на расстоянии всего около 3 см. Как отмечалось выше, близость плазменного шнура к металлической сетке и малая величина магнитной индукции обусловили заметный ток на сетку (рис. 6б).

3.2.3 Формирование трубчатой плазмы при подключении всех катодных элементов. Изображение предыонизирующей плазмы, созданной вспомогательным ВЧ-разрядом внутри ГРК при подключении всех катодных элементов, представлено на рис. 7.

Фоторегистрация проводилась спустя 1 с после включения ВЧ-разряда. С учетом слабого свечения плазмы регистрация проводилась с экспозицией кадра 100 мкс и полностью открытой диафрагмой объектива камеры.

На рисунке видно, что в отличие от случая с одним подключенным катодом (см. рис. 4), при подключении всех катодов вспомогательный ВЧ-разряд создает достаточно однородную предыонизацию газа как по длине межэлектродного промежутка, так по азимуту и радиусу разрядной камеры почти вплоть до металлической сетки. Причина в том, что сдвиг магнитным полем предыонизованной плазмы от какого-либо катода компенсируется ее приходом от соседнего катода и т.д.

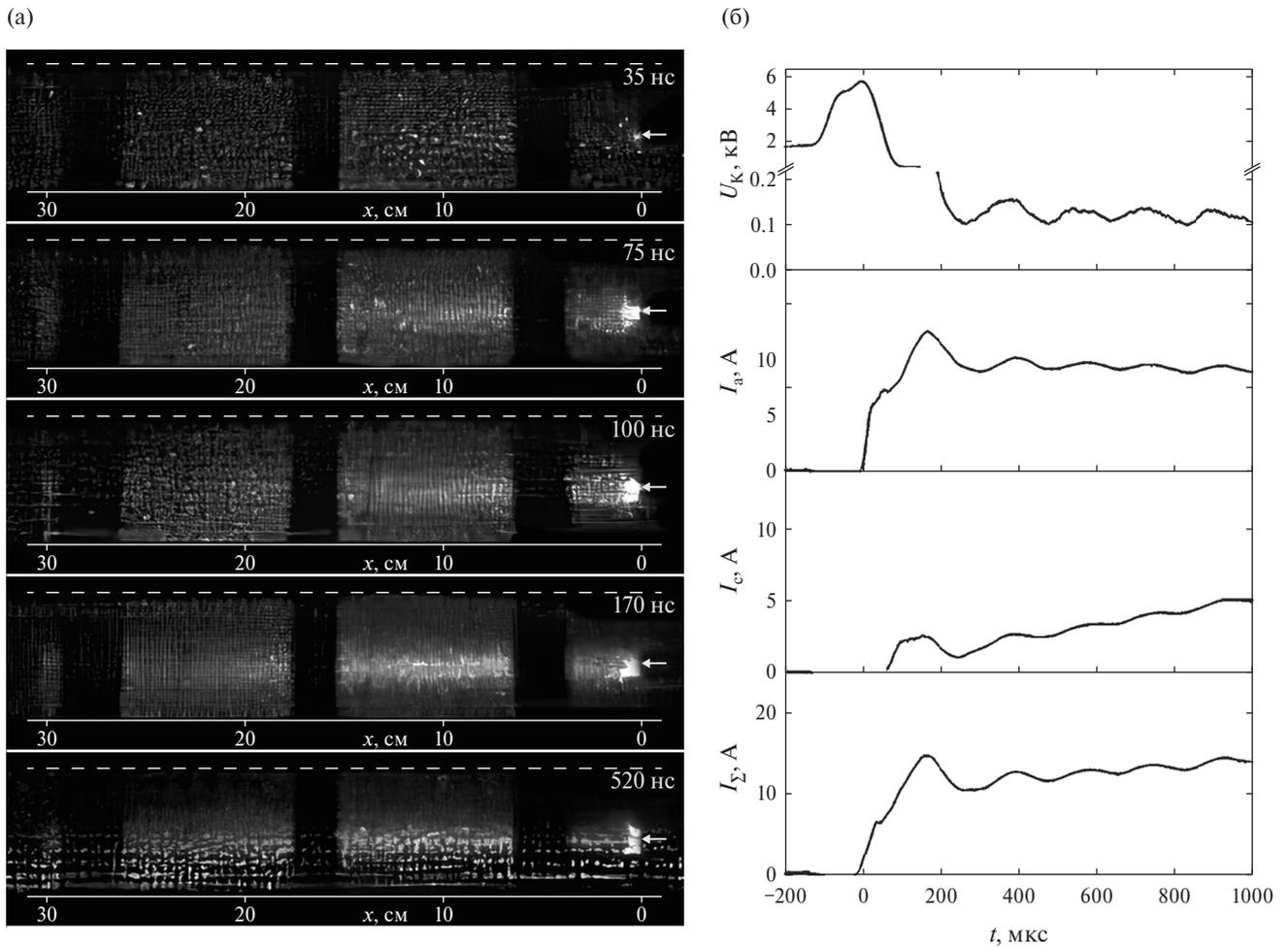


Рис. 6. а) Пять последовательных изображений плазменного шнура в процессе формирования его радиальной структуры. Экспозиция всех кадров 60 нс; желтая стрелка показывает положение катода; пунктирная линия — граница металлической сетки, б) осциллограммы напряжения на катоде U_k , токов на сетку I_c , анод I_a , и суммарного тока $I_\Sigma = I_c + I_a$. Вертикальная ось напряжения на графике $U_k(t)$ имеет разрыв при напряжении $U = 0.22$ кВ, $U = -5$ кВ, аргон, $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Торр, $R = 200$ Ом.

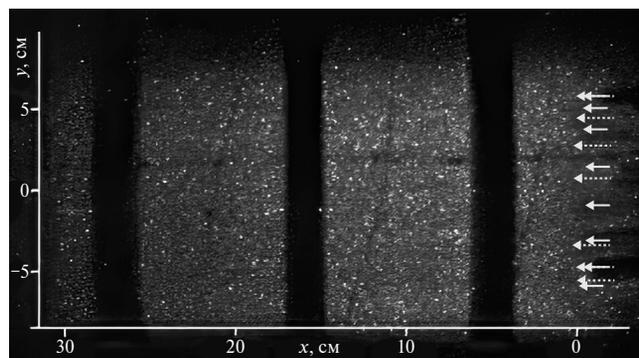
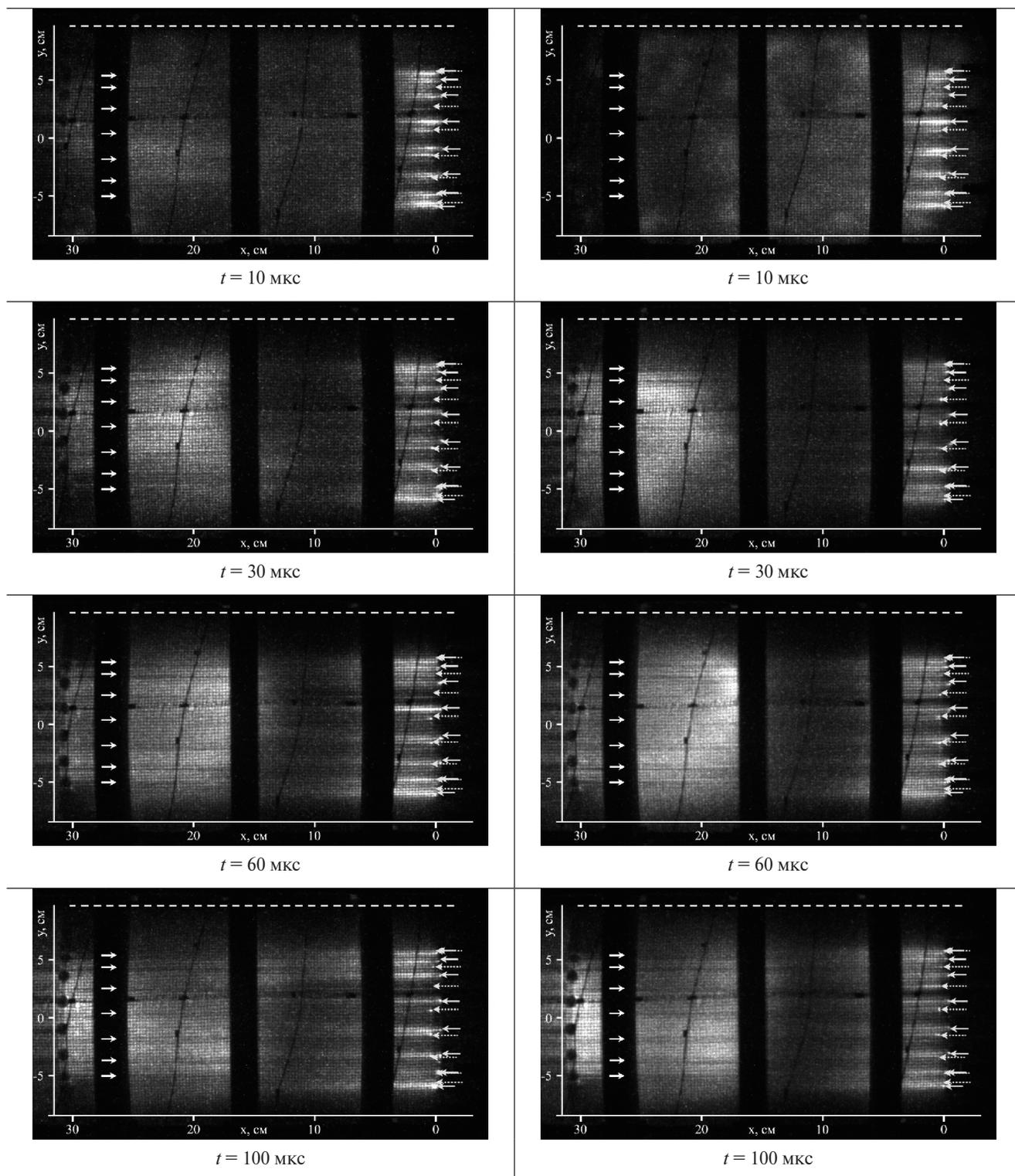


Рис. 7. Изображение диффузной плазмы слаботокового ВЧ-разряда при включении всех катодных элементов. Экспозиция кадра 100 мкс, вертикальные темные полосы — катушки Гельмгольца, винтовая темная тонкая линия — проволока на внешней поверхности металлической сетки, обеспечивающая механическую жесткость сетки, тонкая продольная темная линия — место спайки сетки. Желтые стрелки показывают положение катодов на окружности, сплошные стрелки — ближние к наблюдателю катоды, пунктирные стрелки — дальние от наблюдателя катоды. Давление аргона $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Торр.

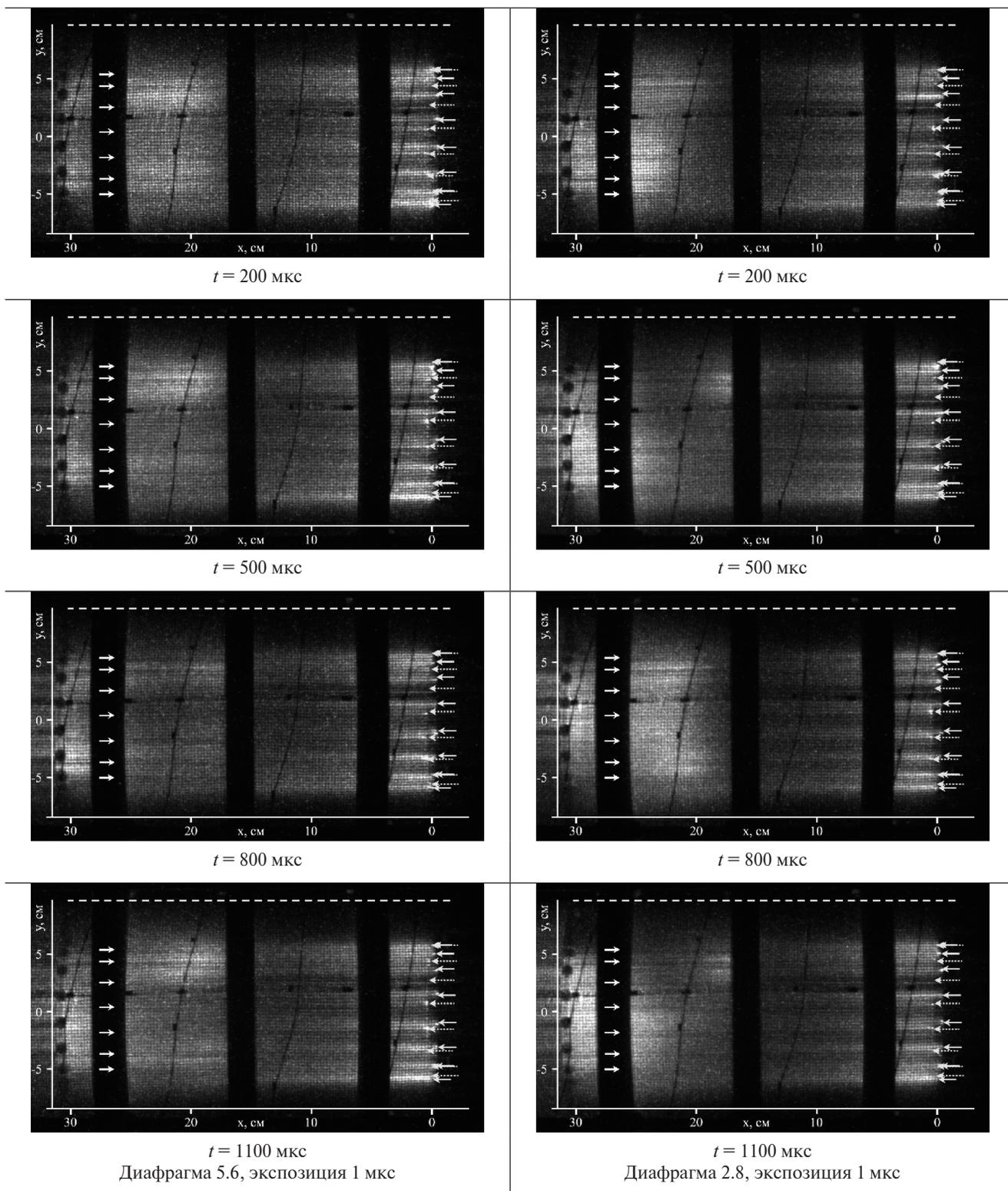
Визуальное представление об эволюции продольной и поперечной структуры трубчатого разряда, сформированного 16-ю токовыми шнурами, дано в виде набора фотокадров в табл. 1 и 2. Желтые стрелки на фото ука-

зывают положения катодов. Пунктирная линия вверху каждого снимка указывает границу сетки. Время съемки кадра, отсчитываемое от момента подачи высокого напряжения на катод, указано под каждым кадром.

Таблица 1. Фотографии трубчатого разряда в разные моменты при импульсном напряжении $U = 5\text{кВ}$ (левый столбец) и $U = 3\text{кВ}$ (правый столбец). $R = 300\text{ Ом}$



Окончание таблицы 1.



Фотографии, представленные в табл. 1, получены при амплитуде импульса напряжения $U = 5 \text{ кВ}$ (левый столбец) и $U = 3 \text{ кВ}$ (правый столбец). В этом случае балластные сопротивления $R = 300 \text{ Ом}$ для

каждого катодного элемента. В табл. 2 представлен набор снимков трубчатого разряда для $U = 5 \text{ кВ}$ и для балластного сопротивления R с величиной 200 Ом . Условия регистрации (диафрагма объектива

камеры и длительность экспозиции) указаны на последнем кадре. Напомним, что чем ярче источник света, тем большее диафрагменное число выбирается, чтобы уменьшить входное отверстие диафрагмы и ограничить световой поток, входящий в камеру, и тем самым не ослепить ее приемную матрицу.

На фотографиях, представленных в табл. 1 и 2, видно, что эволюция продольной и поперечной структуры трубчатого разряда, состоящего из многих плазменных шнуров, в целом подобна эволюции одного шнура, и представлена на рис. 5. Белые стрелки соответствуют положениям тонких диэлектрических трубок, вставленных вне зоны разряда с целью придания механической жесткости конструкции ГРК.

Можно лишь отметить, что при меньшем напряжении и меньшем токе все процессы, определяющие динамику установления разряда, происходят более

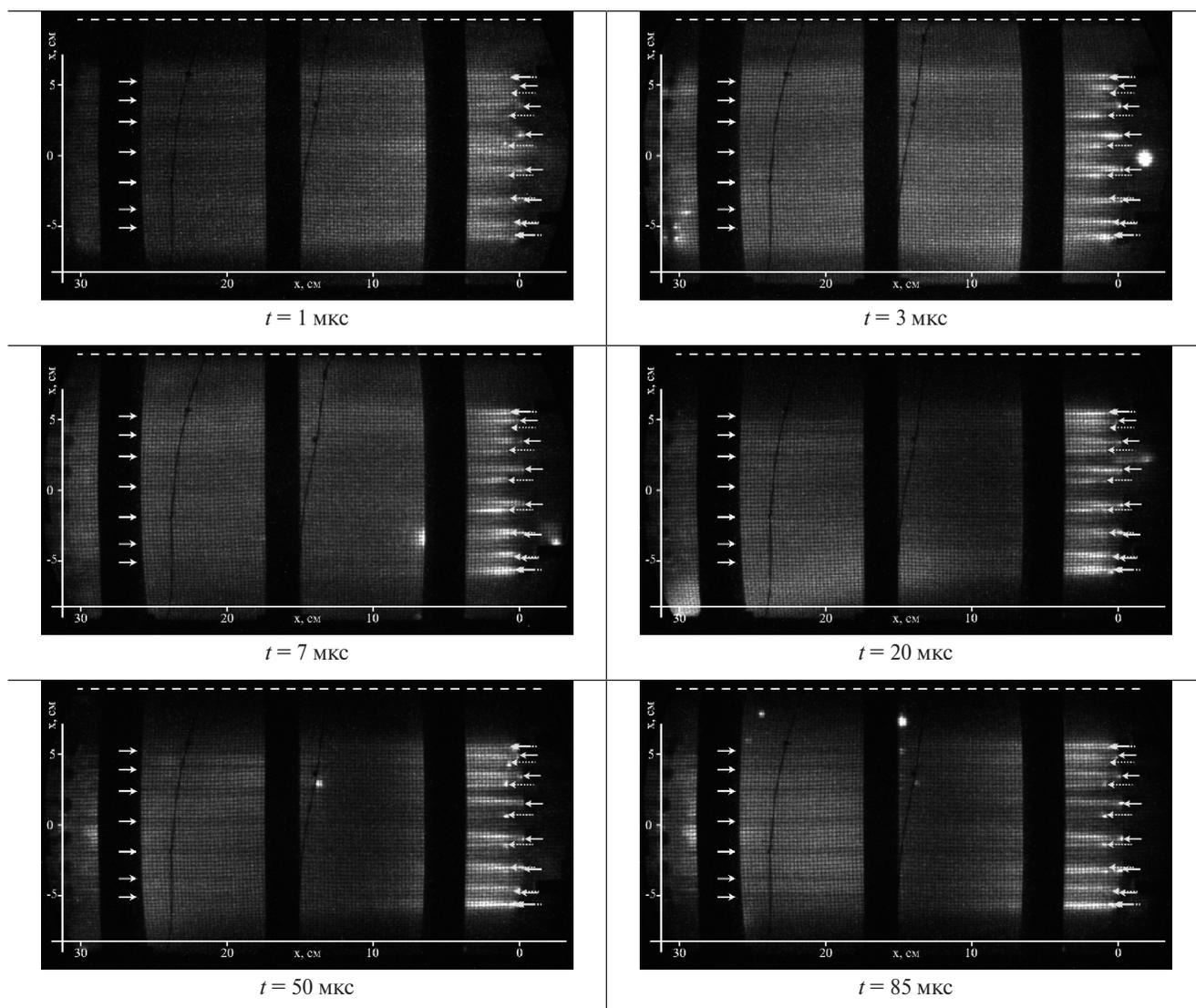
медленно. По мере роста суммарного тока, определяемого амплитудой приложенного напряжения U и величиной балластного сопротивления R отдельного катода, трубчатая плазма становится все более яркой и однородной как по длине, так и в азимутальном и радиальном направлениях. Зарегистрировано также, что с ростом разрядного тока чаще возникают локальные пробои не только с катодов на сетку, но и с поверхности трубчатой плазмы на сетку. Указанное явление хорошо видно на фотографиях табл. 2, которые соответствуют разряду с максимальным током.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

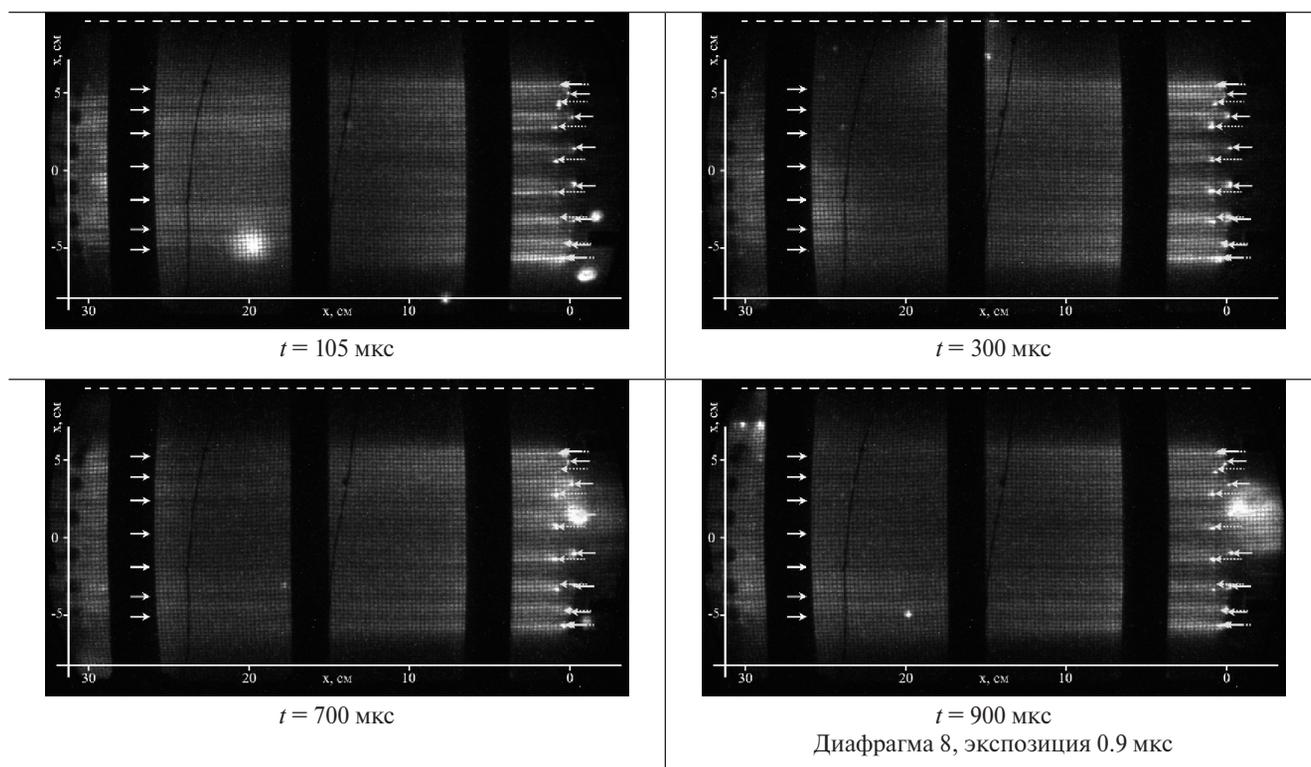
4.1. Первый способ создания предыонизации

Как показали эксперименты, первый (локальный) способ создания предыонизации за счет

Таблица 2. Фотографии трубчатой плазмы в разные моменты при $U = 5\text{ кВ}$ и $R = 200\text{ Ом}$. Токи разряда соответствуют рис. 6



Окончание таблицы 2.



вспомогательных разрядов по поверхности диэлектрика вокруг катодов не обеспечивает необходимой воспроизводимости по времени формирования трубчатой плазмы. Возможная причина связана с влиянием продольного магнитного поля на пробой вспомогательного разряда, поскольку ток этого разряда направлен перпендикулярно магнитному полю. В этом случае траектории электронов закручиваются, и затрудняется их приход на вспомогательный анод, расположенный вокруг катода.

Сокращение времени задержки пробоя вспомогательного разряда вокруг одного из катодов, подключенного одновременно с другими к источнику напряжения, объясняется следующим образом. Время задержки определяется вероятностью появления затравочного электрона в области сильного поля вокруг отдельного катода, находящегося под напряжением.

При одновременном включении большого числа катодов увеличивается общий размер области с сильным электрическим полем и, тем самым, вероятность появления в ней затравочного электрона увеличивается. В результате в каком-либо месте этой большой области достаточно быстро возникает пробой, сопровождающийся яркой вспышкой образовавшейся плазмы. Затем этот пробой инициирует пробой вспомогательного разряда на соседних катодах, предположительно, за счет фотоэмиссии электронов

с поверхности диэлектриков вокруг катодов. Фотоэмиссия возникает также за счет излучения плазмы, сформированной при пробое первого вспомогательного разряда.

4.2. Второй способ создания предьонизации

Во втором (нелокальном) способе предьонизация создается ВЧ-разрядом во всем объеме разрядной зоны вплоть до поверхности сетки. Как оказалось, ВЧ-предьонизация обеспечивает: а) меньший разброс по времени задержки возникновения основного разряда и б) более быстрое его развитие.

При наличии нелокальной предьонизации основной разряд возникает практически одновременно на всех катодных элементах и развивается за время около одной микросекунды после подачи высоковольтного импульса. Это время заметно меньше времени развития разряда, формируемого первым способом. Отсюда можно сделать вывод, что во втором способе создания трубчатой плазмы волна ионизации движется к аноду быстрее. Причина в том, что ионизационная волна движется по газу, хорошо предьонизованному ВЧ-разрядом на всем протяжении от катода до анода. Такое же влияние нелокальной предьонизации наблюдалось ранее при распространении ионизационной волны в капиллярной трубке [8, 9].

4.3. Влияние радиального электрического поля на плазменный шнур

При исследовании динамики одиночного плазменного шнура в продольном магнитном поле было установлено, что в процессе своего формирования изначально широкий шнур немного отходит от стенки кварцевой трубы. В то же время между плазменным шнуром, сформированным вблизи металлической стенки, и стенкой возникают радиальные электрические поля, которые, казалось бы, должны были сдвинуть шнур на стенку. Однако этого не происходит, поскольку продольное магнитное поле существенно уменьшает коэффициенты переноса плазмы в радиальном направлении, а также “сжимает” функцию распределения электронов по энергии, что сказывается на частоте ионизации вдоль радиуса [10–18].

Последний эффект зависит также от напряженности радиального электрического поля E_r , поэтому представляет интерес оценить хотя бы качественно структуру электрического поля в разрядной зоне ГРК после формирования в ней проводящего плазменного

цилиндра. С этой целью были проделаны расчеты двумерного распределения электрического поля в предположении, что потенциал на поверхности плазменного цилиндра меняется линейно вдоль его длины, в то время как внутренняя поверхность металлического корпуса ГРК является эквипотенциальной и заземлена. Результаты 2D-расчетов представлены на рис. 8.

Как видно на этом рисунке, вокруг плазменного цилиндра существует достаточно большая напряженность радиального поля E_r , которая уменьшается по мере удаления от катода. Однако даже на 3/4 длины трубчатой плазмы, отсчитываемой от катода, величина E_r все еще не нулевая. Радиальное поле переносит часть тока из трубчатой плазмы на сетку, т.е. на корпус ГРК, причем чем ближе к катоду, тем больше величина этого тока.

Наличие радиального тока и продольного магнитного поля может приводить к вращению плазменного цилиндра. При этом угловая скорость вращения, пропорциональная E_r , может быть неодинаковой вдоль плазменного цилиндра. В этой

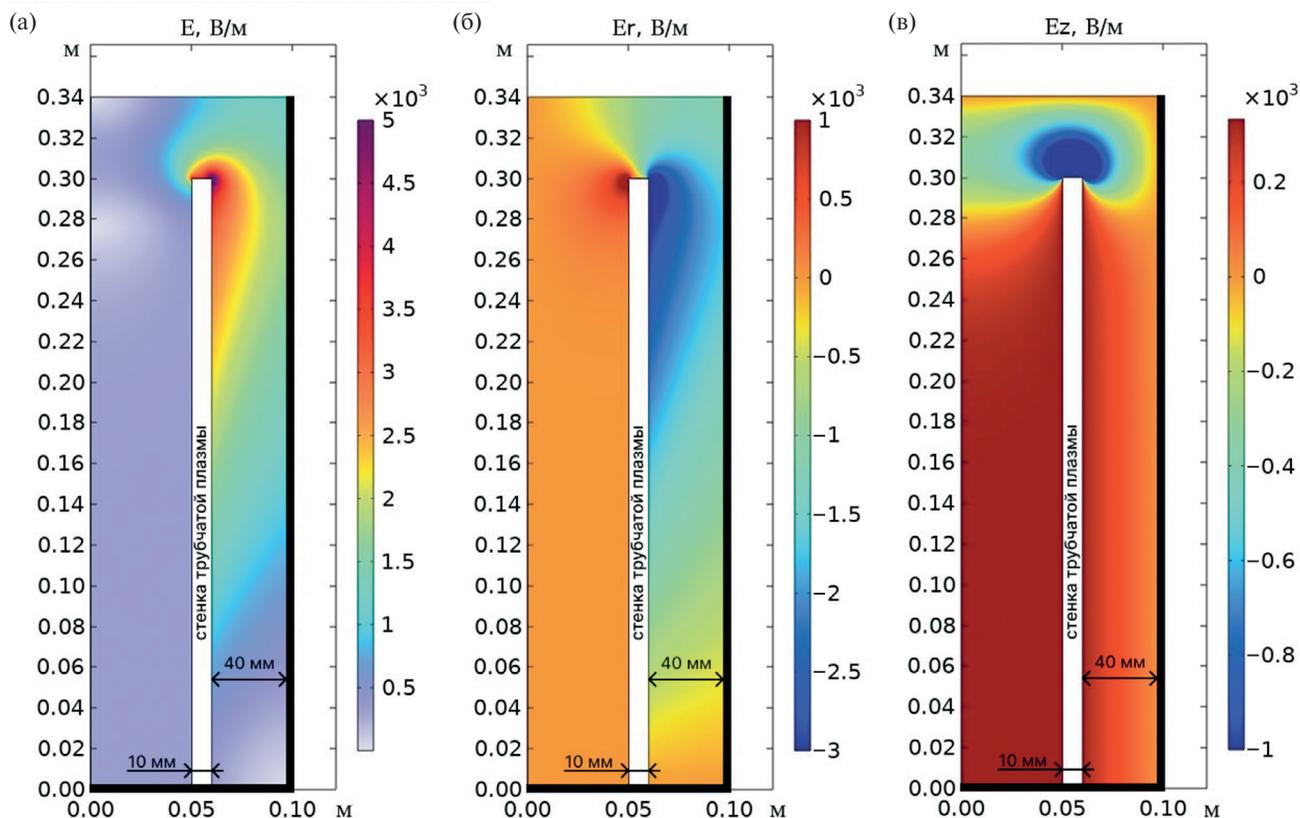


Рис. 8. Двумерная структура аксиально-симметричного электрического поля между трубчатой плазмой и металлической стенкой ГРК (продольный разрез). Падение напряжения вдоль плазмы равно 100 В. Катод сверху, анод (коллектор тока) внизу; а) модуль напряженности электрического поля; б) радиальная компонента электрического поля; в) продольная (вдоль магнитного поля) компонента электрического поля. Черная линия показывает заземленную границу, на которой потенциал равен нулю.

связи уместно заметить, что наблюдаемая в эксперименте квазипериодичность слабых локальных пробоев с катода на сетку, возможно, связана с выносом образовавшейся высокопроводящей плазмы из зоны пробоя силой Ампера F , пропорциональной току j_{\perp} и магнитной индукции B : $F \sim [j_{\perp} \times \vec{B}]$, поскольку вынос этой плазмы создает условия для нового локального пробоя.

Важно отметить, что показанная на рис. 8 качественная двумерная структура электрического поля в ГРК, при наличии трубчатой плазмы с током не зависит от способа ее создания. В таком случае, вероятно, что перечисленные выше эффекты, обусловленные 2D-структурой электрического поля (ток на металлическую стенку ГРК и вращение трубчатой плазмы), могут приводить к изменению параметров трубчатой плазмы в продольном направлении. Это следует учитывать при практическом использовании рассматриваемого источника плазмы.

Измеренные значения анодного тока и напряжения на плазменном цилиндре позволяют оценить величину вложенной энергии. На первый взгляд, абсолютная величина энергозатрат кажется небольшой. Однако, поскольку давление газа в камере низкое, то, по оценкам, на каждую частицу к моменту времени $t = 1$ мс приходится энергии около 1 эВ. Это уже большая величина, которая свидетельствует о том, что плазма может быть полностью ионизованной и находиться в локальном термодинамическом равновесии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенные результаты, можно сказать, что первый способ создания трубчатой плазмы в слабом продольном магнитном поле с использованием локальной предыонизации обеспечивал формирование требуемой плазмы при давлениях аргона в диапазоне 10^{-2} – 10^{-3} Торр и амплитудах приложенного напряжения от 3 до 5 кВ, но с неконтролируемой задержкой, варьирующейся от 90 до 20 мкс. Данный способ формирования трубчатой плазмы достаточно сложен с точки зрения технического воплощения, требующего использования большого количества высоковольтных и сильноточных импульсных схем, индивидуальных для каждого элемента секционированного катода.

Второй способ создания трубчатой плазмы с использованием вспомогательного ВЧ-разряда (нелокальная предыонизация) оказался более простым в исполнении и более стабильным с точки зрения повторяемости результатов. Эксперимент показал, что протяженная ($L = 30$ см) и достаточно

однородная по длине и азимуту трубчатая плазма, формирующаяся из отдельных и перекрывающихся плазменных шнуров, изолируется слабым магнитным полем от металлической стенки мазера и удерживается на расстоянии около 35 мм от стенки. Приемлемая плазма получается при амплитуде импульсного напряжения $U = 5$ кВ, давлении аргона $P = 10^{-2}$ – 10^{-3} Торр и балластном сопротивлении на каждом катоде $R = 200$ Ом. В этом режиме падение напряжения вдоль трубчатой плазмы составляет около 110 В при средней величине напряженности электрического поля в плазме около 4 В/см (падения напряжений на катодном и анодном слоях при оценке средней напряженности поля не учитывались).

Суммарный ток разряда, проходящий через трубчатую плазму на коллектор и частично уходящий на стенку мазера, составляет величину около 260 А. При перечисленных выше параметрах разряд достаточно устойчив по отношению к слабым пробоям на близко расположенную металлическую стенку камеры. При этом в трубчатой плазме сохраняется продольная и азимутальная однородность в течение одной миллисекунды. По оценкам, средняя плотность тока в трубчатой плазме около 2 А/см² при плотности электронов 10^{13} см⁻³ и их температуре около 1 эВ. Для уточнения этих величин необходимы прямые измерения, которые планируется провести в будущем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках реализации комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года” по государственному контракту от 10.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданкевич Л. С., Кузелев М. В., Рухадзе А. А. // УФН. 1981. Т. 133. Вып. 1. С. 3.
2. Стрелков П. С. // УФН. 2019. Т. 189. Вып. 5. С. 494.
3. Buleyko A. B., Ponomarev A. V., Loza O. T., Ulyanov D. K., Andreev S. E. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 023303.
4. Buleyko A. B., Ponomarev A. V., Loza O. T., Ulyanov D. K., Sharypov K. A., Shunailov S. A., Yalandin M. I. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. P. 023304.
5. Карташов И. Н., Кузелев М. В. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 6. С. 531.
6. Akishev Yu., Karalnik V., Kochetov I., Napartovich A., Trushkin N. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. V. 23. P. 054013.

7. Mesyats G.A., Korolev Y. D. // Usp. Fiz. Nauk. 1986. № 148. P. 101.
8. Akishev Yu., Alekseeva T., Karalnik V., Petryakov A. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. V. 55 145202. DOI: 10.1088/1361-6463/ac45af
9. Akishev Yu.S., Karal'nik V.B., Petryakov A. V., Ionikn Yu.Z. // *Plasma Physics Reports*. 2021. V. 47. № 1. P. 60.
10. Hagelaar G.J.M., Pitchford L. C. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. V. 14. P. 722. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011
11. Starikovskiy A.Y., Aleksandrov N. L., Shneider M. N. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2023. V. 32. I. 035005
12. Storozhev D.A., Surzhikov S. T. // *Journal of Basic and Applied Physics*. 2013. V. 2. Iss. 3. P. 141.
13. Surzhikov S.T., Shang J. S. // *AIAA 2014-2236*, 16—20 June 2014, Atlanta, GA. Proc. 45th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf.
14. Surzhikov S.T. // *Plasma Physics Reports*. 2017. V. 43. № 3. P. 363.
15. Shen Gao, Shixiu Chen, Zengchao Ji, Wei Tian, Jun Chen. DC // *Advances in Mathematical Physics*. V. 2017. Article ID9193149. <https://doi.org/10.1155/2017/9193149>
16. Ryakhovskiy A. I., Schmidt A. A., Antonov V. I. // *Proc. ISP RAS*. 2017. V. 29. Iss. 6. P. 299. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(6)-17
17. Ulanov I.M., Pinaev V.A. // *High Temperature*. 2014. V. 52. № 1. P. 26.
18. Shen Gao, Jianyuan Feng, Wenqi Li, Jihe Cai // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2019. V. 88. P. 30801.

Formation of Extended Tubular Plasma in Argon at Low Pressure and in a Weak Longitudinal Magnetic Field

© 2024 Yu. S. Akishev^{a,b,*}, V. P. Bakhtin^a, A. B. Buleyko^a, O. T. Loza^a,
A. V. Petryakov^a, A. A. Ravaev^a, and E. A. Fefelova^a

^a Troitsk Institute for Innovative and Thermonuclear Research, Moscow, 108840, Russia

^b National Research Nuclear University "Moscow Engineering Physics Institute", Moscow, 115409, Russia

* e-mail: akishev@triniti.ru

The results of experimental studies on the formation and subsequent evolution of extended ($l = 300$ mm) and thin-walled ($\Delta r \approx 10$ mm) tubular ($2r \approx 110$ mm) plasma in a weak longitudinal magnetic field ($B = 175$ G) without the use of a thermionic cathode are presented. The cylindrical chamber in which the tubular plasma was formed was pumped with high purity argon (99.998%) at an average velocity of about 1 m/s at a pressure of $P = 10^{-3} - 10^{-2}$ Torr. Two methods of creating seed electrons initiating the development of ionization avalanches were used. The difference inherent to these methods has been established in the dynamics of breakdown, completing in the formation of a tubular discharge. In the first of them, a pulsed discharge preceding the high voltage supply of the main discharge created gas preionization in a small area around the sectioned cathodes. In the second method, seed electrons were created in the entire working area of the discharge chamber by an RF discharge with a frequency of 85 kHz and duration of about 1 s. Highspeed shooting with a 4-frame ICCD camera allowed us to establish the dynamics of tubular discharge formation at all its stages. Measurements of the longitudinal and radial discharge current were carried out. The results we obtained showed the possibility of spatial isolation of an extended tubular plasma from the close located metal wall of the discharge chamber by using a weak longitudinal magnetic field.

Keywords: low pressure gas, tubular plasma, preionization, seed electrons, plasma filament, axial magnetic field