

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОСТИ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ В УСТРОЙСТВАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ

© 2021 г. А. В. Ивановский^{a, b}, А. Е. Калинычев^a, Г. В. Карпов^{a, b, *}

^a Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

^b Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

*e-mail: karпов@elph.vniief.ru

Поступила в редакцию 19.07.2020 г.

После доработки 30.08.2020 г.

Принята к публикации 20.09.2020 г.

В устройстве с плазменным фокусом реализована возможность улучшения начальной азимутальной однородности токовой плазменной оболочки за счет усиления стабилизирующего действия скин-эффекта при повышении начальной скорости нарастания разрядного тока. Используется дополнительный токовый источник, включаемый перед срабатыванием вакуумного разрядника, коммутирующего конденсаторную батарею. Источник создает в разрядной камере пробой вдоль изолятора и следующее сразу за пробоем нарастание тока с высокой начальной скоростью, которая не может быть обеспечена в устройствах с традиционной схемой коммутации вакуумным разрядником. Применение дополнительного токового источника в тестовых экспериментах позволило более чем втрое увеличить рабочее давление дейтерия в камере и существенно повысить стабильность работы устройства. Показано, что при включении дополнительного токового источника в разрядной камере формируется азимутально-однородная токовая плазменная оболочка с достаточно высокой степенью ионизации, исключаящей развитие крупномасштабных токовых возмущений при последующем протекании через оболочку нарастающего тока разряда конденсаторной батареи.

Ключевые слова: устройство с плазменным фокусом, токовая плазменная оболочка, начальная стадия разряда, азимутальная однородность

DOI: 10.31857/S0367292121020049

1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование токовой плазменной оболочки (ТПО) в разрядной камере устройства с плазменным фокусом [1] происходит на начальной стадии сильного электрического разряда, сразу после электрического пробоя вдоль цилиндрического изолятора камеры, и сопровождается увеличением степени ионизации электроразрядной плазмы на восемь–десять порядков [2]. На второй стадии ТПО отрывается от поверхности изолятора и движется под действием сил собственного магнитного поля вплоть до достижения токовой плазмой оси камеры. На заключительной третьей стадии разряда происходит формирование на оси плотного плазменного сгустка, называемого иначе плазменным фокусом, генерирующего нейтронное и рентгеновское излучения. В устройствах с плазменным фокусом источником энергии, обеспечивающим токовый импульс с амплитудой порядка одного или нескольких мегаампер, обычно является высоковольтная конденсаторная батарея. Иногда [3, 4] вместо конденсаторной батареи используется

компактный энергетический источник типа взрывомагнитного генератора [5, 6].

Как было подчеркнуто в [7], структура ТПО, формируемой на начальной стадии мощного импульсного разряда, способна играть определяющую роль в развитии последующих процессов динамики плазмы вплоть до финального сжатия ее на оси камеры. Совокупность факторов, влияющих на формирование ТПО, детально рассматривалась в работах [2, 8–10]. Показано, что развитие азимутальных токовых возмущений начинается при степенях ионизации около 0.01%, когда существенную роль начинают играть ступенчатые ионизационные процессы. При возрастании ионизации свыше 2% развитие возмущений прекращается. Для устройств с плазменным фокусом наибольшую опасность представляют крупномасштабные неоднородности азимутального распределения тока. Возникающие также мелкомасштабные неоднородности типа токовых волокон менее опасны, поскольку впоследствии они сливаются между собой и почти не влияют на конечное формирование плазменного фокуса.

Существуют различные способы улучшения начальной азимутальной однородности ТПО, повышающие стабильность работы устройства в целом. Это выбор материалов электродов и изолятора, точность их изготовления и стыковки, работа при невысоких газовых давлениях, использование небольших добавок инертных газов и т.д. Кроме того, иногда осуществляют предварительную ионизацию рабочего газа вблизи изолятора с использованием индукционного разряда [11], слаботокового тлеющего разряда [12], излучения радиоактивных материалов [13]. На начальную азимутальную однородность ТПО влияет также скин-эффект, стабилизирующее действие которого, согласно расчетам [2, 10], выражается в сглаживании длинноволновых азимутальных токовых возмущений. Механизм стабилизации обусловлен индуцированными электрическими полями, препятствующими опережающему росту токов в местах с локально увеличенной проводимостью плазмы. Сравнительно сильные индуцированные поля характерны для быстрых процессов, поэтому наиболее существенного результата от стабилизирующего действия скин-эффекта следует ожидать при обеспечении достаточно высокой начальной скорости нарастания разрядного тока сразу после электрического пробоя вдоль поверхности изолятора. Данная работа посвящена экспериментальной проверке возможности улучшения азимутальной однородности ТПО подобным способом.

2. МОДЕРНИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО С ПЛАЗМЕННЫМ ФОКУСОМ

В устройствах с плазменным фокусом для коммутации высоковольтных конденсаторных батарей используются управляемые сильноточные разрядники различных типов, в том числе и малоиндуктивные вакуумные разрядники, удобные для работы с напряжением в десятки киловольт. Схема одного из вариантов вакуумного разрядника для сильноточных плазменных экспериментов была предложена Н.В. Филипповым [14]. Впоследствии было изготовлено несколько опытных партий подобных разрядников [15], один из которых использован в данной работе.

Быстродействие разрядника можно характеризовать временем разгорания τ_p , в течение которого, начиная с момента начала инициирования, происходит значительное снижение разности потенциалов $U_p(t)$ между его электродами. При коммутации конденсаторной батареи на индуктивную нагрузку L_0 зависимость от времени межэлектродной разности потенциалов нетрудно определить по производной тока, измеренной в самом начале разряда, $U_p(t) = U_0 - L_0 dI/dt$. Для грубых оценок удобно пользоваться линейным

приближением, $U_p(t) \approx U_0(1 - t/\tau_p)$, куда входят только длительность τ_p и напряжение зарядки конденсаторной батареи U_0 . Определяемое таким образом время разгорания вакуумного разрядника [15] составляет около 0.5 мкс при остаточном давлении в нем $(3-5) \times 10^{-3}$ Торр. С увеличением степени вакуумной откачки длительность τ_p возрастает. При использовании подобного разрядника в устройстве с плазменным фокусом одновременно с увеличением τ_p наблюдается ухудшение стабильности работы разрядной камеры. Это можно связать с возрастающим ограничением начальной скорости нарастания коммутируемого тока, $dI/dt \approx (U_0/L_0)t/\tau_p < (U_0/L_0)$, на стадии разгорания разрядника, $t < \tau_p$, и снижением за счет этого стабилизирующего действия скин-эффекта по сдерживанию развития в ТПО крупномасштабных токовых возмущений. Для устройств с плазменным фокусом предельное значение dI/dt , равное отношению U_0 к начальной индуктивности L_0 разрядного контура, обычно порядка 10^{12} А/с [16]. Помимо вакуумного разрядника, на начальную скорость нарастания тока, в принципе, может влиять омическое сопротивление ТПО, формирование которой идет одновременно с разгоранием разрядника. Однако это влияние можно предполагать гораздо менее сильным, так как омическое сопротивление ТПО оказывается несущественным уже на раннем этапе ее формирования задолго до начала ступенчатых ионизационных процессов [2]. Попытки улучшения стабильности работы разрядной камеры за счет выбора режима откачки разрядника не дают весомого результата, поскольку таким способом удается уменьшить τ_p только до 0.3 мкс.

Для решения проблемы было предложено [17] модернизировать устройство с плазменным фокусом таким образом, чтобы достаточно высокая начальная скорость нарастания тока в камере обеспечивалась дополнительным токовым источником независимо от вакуумного разрядника. В модернизированном устройстве, схематически представленном на рис. 1, дополнительный токовый источник, называемый иначе быстрым токовым генератором, подключается к разрядной камере параллельно с конденсаторной батареей, коммутируемой вакуумным разрядником [15]. Быстрый токовый генератор и разрядник соединены с камерой непосредственно, без промежуточной кабельной линии, чтобы избежать потери энергии на возбуждение в ней электромагнитных колебаний. В модернизированном устройстве использовалась разрядная камера мейзеровского типа [16]. Электроды камеры изготовлены из нержавеющей стали; диаметр анода 70 мм, внутренний диаметр катода 120 мм, длина электродов 280 мм. Разделительный цилиндрический изолятор с рабочей длиной 70 мм выполнен из керами-

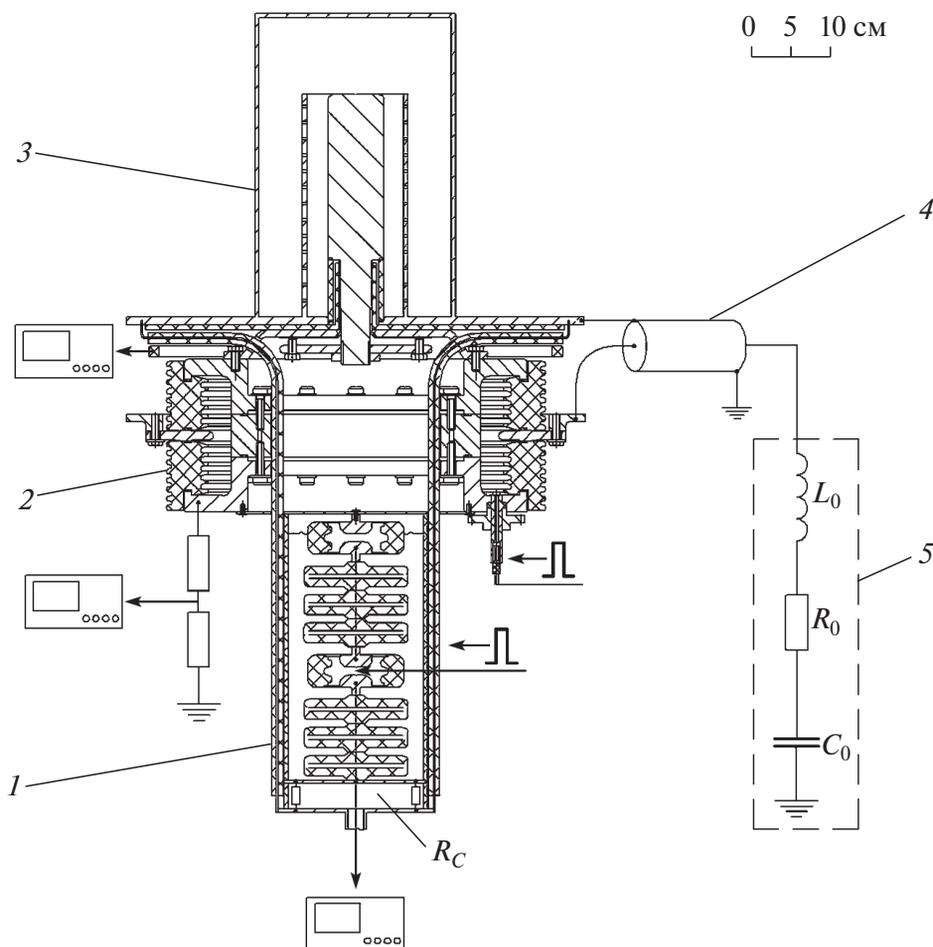


Рис. 1. Модернизированное устройство с плазменным фокусом: 1 – быстрый токовый генератор, 2 – вакуумный разрядник, 3 – разрядная камера, 4 – кабельная линия, 5 – конденсаторная батарея.

ки и имеет внешний диаметр 70 мм. Быстрый токовый генератор собран в виде двух каскадов по известной схеме Аркадьева–Маркса. Каскады включают в себя по три последовательно соединенных керамических конденсатора К15-10 емкостью 5800 пФ. Каждый каскад заряжается до 100 кВ, коммутация осуществляется двумя газонаполненными разрядниками, один из которых управляемый. Высоковольтные элементы быстрого токового генератора размещены в диэлектрическом корпусе, заполненном трансформаторным маслом. Для уменьшения индуктивности соединения с разрядной камерой обратный токопровод генератора выполнен гибкими изолированными проводниками, расположенными равномерно по углу вдоль внешней цилиндрической поверхности диэлектрического корпуса. Изолированные проводники обратного токопровода проходят внутри центрального кольцевого электрода вакуумного разрядника и соединены с заземленным фланцем разрядной камеры. Ток генератора измеряется с помощью встроенного то-

кового шунта с омическим сопротивлением $R_c = 1.01 \times 10^{-2}$ Ом. Из приведенной на рис. 2 осциллограммы видно, что временная зависимость тока в цепи разряда быстрого токового генератора имеет вид затухающих колебаний с периодом около 90 нс. При дейтериевом наполнении камеры от единиц до 30 Торр отмечается хорошая повторяемость токовой кривой при идентичных условиях и наблюдается слабая зависимость амплитуды и периода токовых колебаний от давления рабочего газа. По измеренному периоду колебаний можно найти индуктивность разрядного контура быстрого токового генератора, $L = 210$ нГн, с учетом, что его емкость C в ударе составляет 967 пФ. Зная L , C и начальное напряжение на выходе генератора, $U = 200$ кВ, нетрудно оценить амплитуду и начальную скорость нарастания разрядного тока. Определенные таким образом значения токовых параметров удовлетворительно согласуются с аналогичными данными, $I_m = 14$ кА и $dI/dt|_{t=0} = (0.8-3) \times 10^{12}$ А/с, получаемыми непосредственно из токовой осцилло-

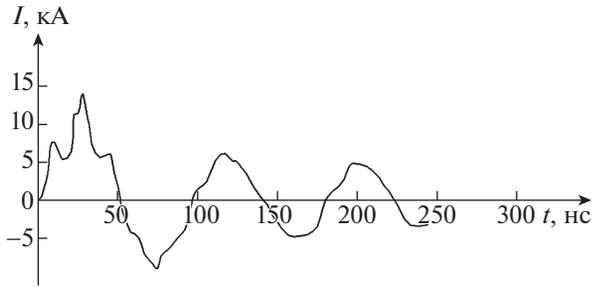


Рис. 2. Осциллограмма разряда быстрого токового генератора.

граммы. Разброс указанных значений начальной производной тока обусловлен сложной формой токовой кривой в первой четверти периода колебаний.

Основным источником энергии в модернизированном устройстве с плазменным фокусом является конденсаторная батарея емкостью $C_0 = 240$ мкФ с запасаемой энергией 108 кДж при зарядном напряжении $U_0 = 30$ кВ. Конденсаторы соединены с вакуумным разрядником низкоиндуктивной кабельной линией. Индуктивность L_0 и сопротивление R_0 разрядного контура батареи равны соответственно 27×10^{-9} Гн и 1.7×10^{-3} Ом. Напряжение на электродах и разрядный ток измеряются с помощью омического делителя и пояса Роговского. Синхронизация пуска вакуумного разрядника и быстрого токового генератора осуществляется с использованием кабельных линий задержки. Было проведено несколько серий тестовых экспериментов с модернизированным устройством с плазменным фокусом. Показано, что максимальный эффект от применения быстрого токового генератора достигается, когда момент начала его разряда совпадает с началом импульса инициирования вакуумного разрядника. Работа устройства с плазменным фокусом при этом меняется коренным образом. Без быстрого токового генератора устройство работало стабильно при давлениях дейтерия до (5–7) Торр и зарядном напряжении конденсаторной батареи не выше (20–25) кВ. Применение быстрого токового генератора позволило увеличить рабочее давление дейтерия до (20–25) Торр и обеспечить стабильную работу устройства во всем рабочем диапазоне напряжений зарядки конденсаторной батареи, вплоть до 30 кВ. Используемое здесь понятие «стабильная работа» предполагает работу устройства, при которой выходы нейтронов, получаемые в разрядах с одинаковыми исходными условиями, различаются не более чем в полтора раза. На рис. 3 приведены типичные осциллограммы напряжения и тока в камере из серии экспериментов с быстрым токовым генератором при зарядном напряжении конденсаторной батареи

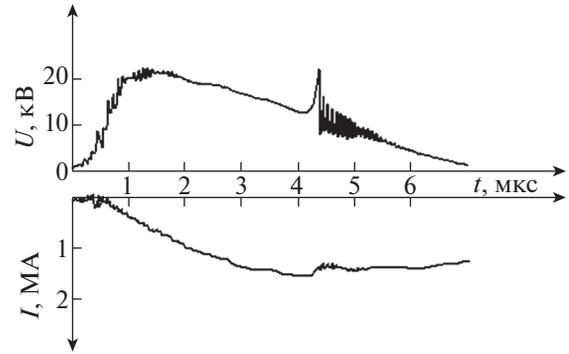


Рис. 3. Осциллограммы разряда с использованием быстрого токового генератора.

30 кВ и давлении дейтерия в камере 15 Торр. Нейтронные измерения проводились с использованием сцинтилляционных [18] и активационных [19, 20] методик. Нейтронный выход для этой серии, усредненный по десяти контрольным разрядам, равен 6×10^{10} н/имп. Максимальный разброс нейтронных выходов относительно среднего значения составляет около 20%. В аналогичной серии, но без включения быстрого токового генератора, нейтронный выход меняется от разряда к разряду более чем на порядок, оставаясь в десятки раз меньше, чем в разрядах с быстрым токовым генератором. Амплитудно-временные характеристики осциллограмм разряда при этом остаются примерно такими же, как и у приведенных на рис. 3, однако момент образования плазменного фокуса выражен на них в меньшей степени, — на токовой кривой отсутствует характерный спад тока, а скачок напряжения не сопровождается последующими колебаниями.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

В экспериментах с модернизированным устройством с плазменным фокусом продемонстрирована возможность радикального улучшения работы устройства в целом за счет достаточно высокой, порядка 10^{12} А/с, начальной скорости нарастания тока разряда, обеспечиваемой быстрым токовым генератором. Существенной особенностью воздействия быстрого токового генератора на работу модернизированного устройства является то, что оно достигается при энергетике генератора меньше 0.02% от запасаемой энергии конденсаторной батареи. Это указывает на то, что механизм воздействия связан с формированием ТПО на начальной стадии разряда, когда вводимая в разрядную камеру энергия еще чрезвычайно мала по сравнению с последующим энерговыделением. Если это действительно так, ТПО создаваемая перед началом разгорания вакуумного

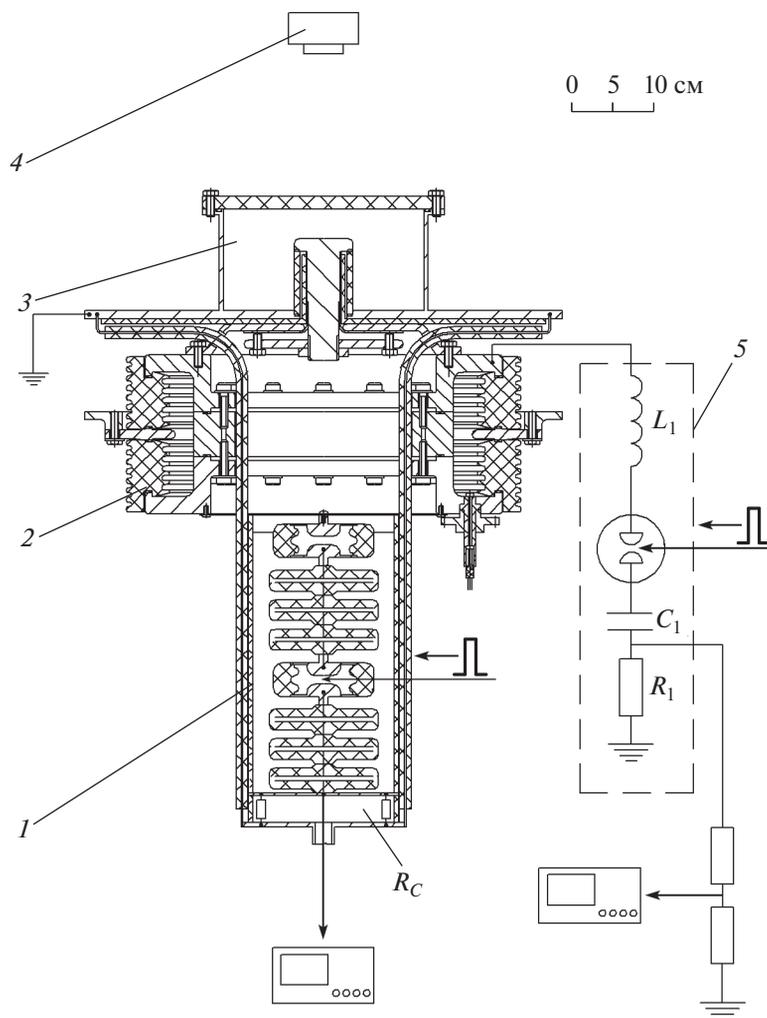


Рис. 4. Стенд для формирования токовых плазменных оболочек: 1 – быстрый токовый генератор, 2 – вакуумный разрядник, 3 – разрядная камера, 4 – фотоаппарат, 5 – медленный токовый источник.

разрядника должна обладать двумя фундаментальными свойствами. Во-первых, она сама не должна иметь крупномасштабных азимутальных неоднородностей распределения тока. Во-вторых, степень ионизации плазмы в ней должна быть достаточно высокой, чтобы исключалась возможность развития крупномасштабных токовых возмущений при последующем прохождении через оболочку нарастающего тока разряда конденсаторной батареи.

Для выявления указанных свойств были проведены специальные эксперименты по формированию ТПО. Условия экспериментов выбирались такими, чтобы плазма не отрывалась от поверхности изолятора и благодаря этому исключалось влияние плазменного движения на наблюдаемую азимутальную структуру формируемой ТПО. Это обеспечивается за счет соответствующего выбора амплитудных значений разрядных токов и давления газа в камере, при которых магнитное давле-

ние остается меньше газокинетического. В этом плане условия экспериментов по формированию ТПО идентичны условиям начальной стадии плазмофокусного разряда. Стенд для формирования токовых плазменных оболочек вблизи изолятора схематично представлен на рис. 4. Помимо описанного выше быстрого токового генератора, в экспериментах использовался сравнительно медленный токовый источник с менее крутым фронтом импульса тока. Формирование ТПО происходило в разрядной камере с коротким потенциальным электродом диаметром 70 мм, отделенным от заземленного фланца керамическим изолятором с теми же размерами, что и разделительный изолятор модернизированного устройства с плазменным фокусом. В торце камеры имеется окно для фотографирования электро-разрядной плазмы. Камера закреплена на вакуумном разряднике, который используется здесь только как механический элемент конструкции.

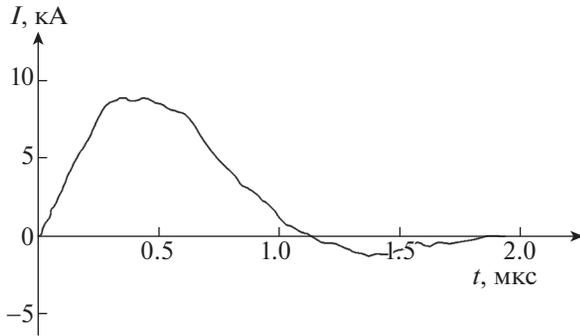


Рис. 5. Осциллограмма тока медленного токового источника.

Соединение быстрого токового генератора с разрядной камерой выполнено так же, как и в модернизированном устройстве с плазменным фокусом. В результате все параметры разрядного контура быстрого токового генератора остались в точности такими же, как и прежде. Для сравнения азимутальных структур ТПО, создаваемых при разных условиях, в состав стенда включен упомянутый выше медленный токовый источник, обеспечивающий более низкую, по сравнению с быстрым токовым генератором, скорость нарастания разрядного тока. Импульс тока медленного источника формируется с использованием разряда конденсатора $C_1 = 0.1$ мкФ, заряжаемого до 50 кВ и коммутируемого газонаполненным разрядником. Входящие в состав разрядного контура индуктивность L_1 и омическое сопротивление R_1 используются для корректировки формы токового импульса.

На рис. 5 приведена осциллограмма тока, полученная при $L_1 = 1$ мкГн, $R_1 = 2.76$ Ом. Длительность токового импульса составляет около микросекунды; нарастание тока до максимального значения ~ 9 кА происходит примерно за 0.3 мкс. На фронтальном участке скорость роста тока можно принять равной 3×10^{10} А/с. Как и у быстрого токового генератора, кривая тока медленного источника практически не зависит от изменения давления дейтерия в камере в диапазоне до 30 Торр. В экспериментах регистрировалось интегральное свечение электроразрядной плазмы. Для получения интегральных плазменных снимков использовался фотоаппарат с открытым затвором. Светосила объектива фотоаппарата для всех разрядов выдерживалась одинаковой, благодаря чему по яркости получаемых снимков можно сравнивать энергосодержание светящейся плазмы в различных разрядах. Для выбранных амплитудных значений токов разряда быстрого токового генератора и медленного токового источника светящаяся электроразрядная плазма, при давлениях дейтерия в камере свыше 5 Торр,

сосредоточена вблизи поверхности изолятора. В случае невысоких давлений, меньше 5 Торр, изображения получаются не очень контрастными. Возможно, это обусловлено динамикой формирования ТПО при невысоких давлениях газа, либо связано с кратковременным отрывом плазмы от поверхности изолятора.

Эксперименты, проводимые при давлении дейтерия в диапазоне от 10 до 30 Торр, можно разделить на три серии. Первые две серии — это эксперименты с самостоятельными включениями отдельно быстрого токового генератора и отдельно медленного токового источника. В третьей серии экспериментов регистрировались изображения ТПО совмещенных разрядов; моменты начала разрядов регулировались с использованием кабельных линий задержки. Основное внимание уделено совмещенным разрядам с упреждающим включением быстрого токового генератора. Совокупность данных по всем экспериментам находится в рамках определенной закономерности, которую можно наглядно проиллюстрировать фотографиями разрядов, полученными при давлении дейтерия 10 Торр. На рисунке 6 приведены типичные снимки электроразрядной плазмы для каждой из проведенных серий. Результаты первой серии экспериментов представлены фотографией рис. 6а. Электроразрядная плазма быстрого токового генератора сосредоточена вблизи изолятора и имеет вид азимутально-однородной оболочки толщиной около 4 мм. Энергосодержание ее, судя по яркости снимка, мало по сравнению с электроразрядной плазмой медленного токового источника. Конфигурация и яркость свечения плазмы стабильно повторяются от разряда к разряду. Результаты второй серии экспериментов, представленные фотографией рис. 6б, свидетельствуют о том, что электроразрядная плазма медленного токового источника имеет нерегулярную структуру в виде нескольких, сравнительно крупномасштабных, плазменных образований. Их число, форма и расположение вблизи изолятора меняются случайным образом от разряда к разряду. Различие электроразрядных плазменных конфигураций, характерное для первых двух серий экспериментов, является следствием существенного различия начальных скоростей нарастания токов быстрого токового генератора и медленного токового источника. В третьей серии экспериментов наблюдается зависимость азимутальной структуры ТПО совмещенного разряда от момента упреждающего включения быстрого токового генератора, если оно происходит не более чем за 200 нс до включения медленного токового источника. С уменьшением интервала между включениями азимутальная однородность ТПО совмещенного разряда возрастает. На рис. 6в приведена фотография совмещенного разряда при упреждающем включении быстрого токового ге-

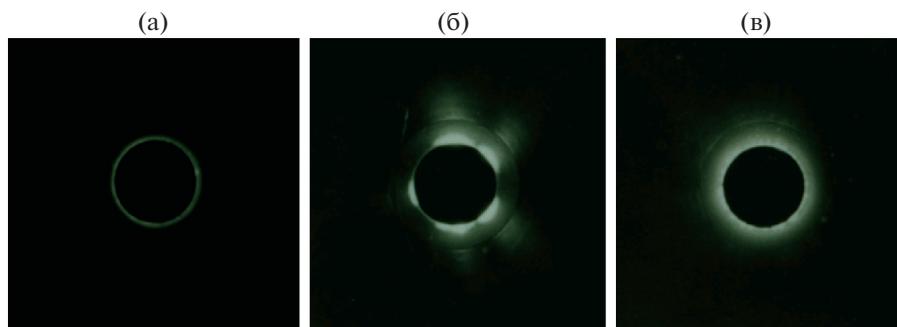


Рис. 6. Фотографии электроразрядной плазмы: а) — разряд быстрого токового генератора; б) — разряд медленного токового источника; в) — совмещенный разряд с упреждающим включением быстрого токового генератора.

нератора за 10 нс до начала разряда медленного токового источника. Наблюдаемое улучшение азимутальной однородности ТПО совмещенного разряда свидетельствует о том, что предварительно создаваемая азимутально-однородная электроразрядная плазма быстрого токового генератора имеет достаточно высокую степень ионизации для предотвращения развития крупномасштабных токовых возмущений при последующих изменениях тока. Очевидно, аналогичные условия формирования ТПО на начальной стадии разряда реализуются и в модернизированном устройстве с плазменным фокусом. Только роль медленного токового источника в модернизированном устройстве играет конденсаторная батарея на этапе разгорания коммутирующего ее вакуумного разрядника.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В устройстве с плазменным фокусом реализована возможность улучшения начальной азимутальной однородности токовой плазменной оболочки за счет усиления стабилизирующего действия скин-эффекта при повышении начальной скорости нарастания тока. Используется модернизированное устройство с плазменным фокусом, в котором, помимо разрядной камеры мейзеровского типа и коммутируемой вакуумным разрядником конденсаторной батареи, содержится дополнительный токовый источник — быстрый токовый генератор, соединенный с камерой параллельно с конденсаторной батареей. Быстрый токовый генератор включается перед срабатыванием разрядника, создавая в разрядной камере пробой вдоль изолятора и следующее сразу за пробоем нарастание тока с высокой, около 10^{12} А/с, начальной скоростью, которая не может быть обеспечена в устройствах с традиционной схемой коммутации вакуумным разрядником. Применение быстрого токового генератора в тестовых экспериментах дало возможность увеличения рабочего давления дейтерия в камере более

чем в три раза и обеспечило стабильную работу устройства при повышенных напряжениях зарядки конденсаторной батареи. Проведены модельные эксперименты по формированию плазменных оболочек с использованием разрядов медленного токового источника, $dI/dt|_{t=0} = 3 \times 10^{10}$ А/с, и быстрого токового генератора, $dI/dt|_{t=0} = 10^{12}$ А/с. Электроразрядная плазма медленного токового источника имеет явно неоднородную структуру, тогда как при разряде быстрого токового генератора образуется азимутально-однородная токовая оболочка. При совмещении разрядов упреждающее включение быстрого токового генератора приводит к улучшению азимутальной однородности электроразрядной плазмы с достижением максимального эффекта при включении быстрого токового генератора за 10 нс до начала разряда медленного токового источника. Наблюдаемое улучшение однородности совмещенных разрядов свидетельствует о том, что степень ионизации азимутально-однородной электроразрядной плазмы быстрого токового генератора достаточно высока для предотвращения последующего развития крупномасштабных токовых возмущений. Результаты модельных экспериментов подтверждают, что в модернизированном устройстве с плазменным фокусом позитивное воздействие разряда быстрого токового генератора происходит за счет усиления стабилизирующего действия скин-эффекта, предотвращающего развитие токовых возмущений в плазменной оболочке в начале разряда конденсаторной батареи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцев В.А., Грибков В.А., Филиппова Т.И. Итоги науки и техники / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ АН СССР, 1981. Физика плазмы. Т. 2. С. 80.
2. Брагинский С.И., Вихрев В.В. Препринт ИАЭ № 2442. М.: ИАЭ, 1974.

3. Дудай П.В., Зименков А.А., Иванов В.А., Иванов Е.И., Карпов Г.В., Полюшко С.М., Скобелев А.Н., Февралев А.Ю. // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 1 (329). С. 57.
4. Аблесимов В.Е., Андрианов А.В., Базанов А.А., Глыбин А.М., Долин Ю.Н., Дроздов И.Ю., Дроздов Ю.М., Дудай П.В., Зименков А.А., Иванов В.А., Ивановский А.В., Калинычев А.Е., Карпов Г.В., Краев А.И., Ломтев С.С., Худиков В.Н., Пак С.В., Поздов Н.И., Полюшко С.М., Рыбаков А.Ф., Скобелев А.Н., Туров А.Н., Февралев А.Ю. // ПМТФ. 2015. Т. 56. № 1 (329). С. 94.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
6. Чернышев В.К. // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам "Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения". Саратов, 1997. С. 41.
7. Брагинский С.И., Будкер Г.И. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. С. 186.
8. Брагинский С.И., Вихрев В.В. // ЖТФ. 1973. Т. 63. № 12. С. 2509.
9. Брагинский С.И., Вихрев В.В. // Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14. С. 254.
10. Вихрев В.В., Брагинский С.И. Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 10. С. 243.
11. Кварцхава И.Ф., Хаутиев Э.Ю. Исследование плазменного фокуса коаксиального ускорителя с пре-дыонизацией газа. М.: Машиностроение, 1973.
12. Ahmad S., Sadiq M., Hussain S., Shafiq M., Lee P., Zakaullah M. and Waheed A. // Europhys. Lett. 2006. V. 73. № 1. P. 42.
13. Ahmad S., Qayyum A., Hassan M. and Zakaullah M. // Plas. Phys. Reports. 2017. V. 43. № 7. P. 749.
14. Filippov N.V., Filippova T.I., and Vinogradov V.P. // Nuclear Fusion Suppl. in 1st Int. Conf. on Plasma Fusion Physics, Salzburg, 1962 // Publ. by IAEA as Nuclear Fusion Suppl. 1962. V. 2. P. 577–587.
15. Павловский А.И., Смирнов Е.Н., Суворов В.Н., Латыш В.Я., Черкасов А.А. // ПТЭ. 1974. № 1. С. 122.
16. Mather J.W., Bottoms P.J. // Phys. Fluids. 1968. V. 11. № 3. P. 611.
17. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карпов Г.В. // Авторское свидетельство СССР "Устройство для получения импульсных нейтронного и рентгеновского излучений" № 2774052/25 от 23.04.1979.
18. Веретенников А.И., Даниленко К.Н. Средства диагностики однократного импульса излучения. М.: Изд-во АТ, 1999.
19. Брагин В.В., Глушихин В.В., Голубев В.И. // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 1997. С. 153.
20. Голубев В.И., Макеев Н.Г., Пащенко Е.С. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 37. № 1. С. 18.