

Сеточное управление большими токами в цезиевом разряде с катодным пятном

© В.Б. Каплан, А.М. Марциновский, И.И. Столяров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: stolyarov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2015 г.)

Приведены результаты исследования плазменного ключа с полным сеточным управлением в разряде с катодным пятном на жидкометаллическом цезиевом катоде без диафрагмирования сетки. Отказ от уменьшения рабочей площади сетки по отношению к площади анода привел к росту коммутуруемого анодного тока на порядок (до 20 A/cm^2 по площади анода) и значительному, до 100 V и более, увеличению коммутуруемых напряжений. Использование катодной струи позволило на порядок снизить рабочие давления паров цезия (до $\sim 10^{-3} \text{ Torr}$). Обсуждены результаты исследования особенностей сеточного гашения в таком ключе, позволившие определить возможные причины ограничения рабочих параметров ключа и наметить пути их дальнейшего повышения.

1. В работах [1–3] представлены начальные результаты исследования сеточного управления током разряда с катодным пятном на цезиевом жидкометаллическом катоде. Эти исследования были стимулированы перспективой разработки плазменных ключей для наземных применений. Как известно, плазменные ключи с полным сеточным управлением (ПКС), обеспечивающие поджиг и гашение разряда положительным и отрицательным сеточным импульсом, создавались для инвертирования низкого постоянного выходного напряжения ($\sim 10\text{--}100 \text{ V}$) термоэмиссионных реакторов-преобразователей для космических энергоустановок. Такие ключи, работающие в режиме кнудсеновской низковольтной дуги с термоэмиссионным катодом, обеспечивают модуляцию токов $\sim 1\text{--}10 \text{ A/cm}^2$ на частотах до 100 kHz , при прямых падениях напряжения всего $1.5\text{--}2 \text{ V}$ и способны работать при высоких уровнях радиации и температуры окружающей среды (что является основным требованием для космических ядерных энергоустановок) [3,4].

Наземным применениям ПКС (тоже в экстремальных условиях) препятствует ряд принципиальных недостатков, в первую очередь относительно небольшие модулируемые токи. При рабочих давлениях в несколько сотых Torr самые эффективные катодные материалы не могут обеспечить необходимую эмиссию, а увеличение давления резко уменьшает эффективность сеточного гашения [5]. Поэтому и возникла идея снять ограничение тока, используя разряд с катодным пятном на жидком цезии, что не ограничивает срок службы эрозией (как на твердом катоде). Такой разряд устраняет и другие недостатки ПКС: необходимость нагревать прибор до температуры $\sim 200^\circ\text{C}$, необходимость стабилизации температуры жидкой фазы цезия для обеспечения рабочего давления его паров, не требуются затраты энергии на разогрев катода и стабилизация его температуры. Относительно высокие выходные напряжения $\sim 100 \text{ V}$ рассматриваемых сейчас ТРП для космических энергоустановок [4] делают в принципе возможным исполь-

зование подобных ключей и для создания для них инверторов.

Первая же попытка осуществить гашение отрицательным сеточным импульсом в разряде с катодным пятном оказалась успешной — гашение было реализовано при коммутации напряжений в десятки вольт в области давлений цезия $0.5\text{--}1.5 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ при падении напряжения на разряде $5\text{--}6 \text{ V}$ [1,2]. Однако коммутуруемые токи оказались небольшими, не более $4\text{--}5 \text{ A}$, так как при больших токах разряд был неустойчив — после поджига разряда происходил самопроизвольный обрыв тока без подачи на сетку отрицательного импульса. Причина такого поведения разряда была обусловлена сильным диафрагмированием сетки — ее диаметр составлял 3 mm при диаметре анода 6 mm , что создавало в плоскости витков сетки плотность тока в десятки A/cm^2 . Это было сопоставимо с плотностью хаотического тока в плазме для указанных выше давлений цезия (при предельной степени ионизации), что, как известно, и является условием возникновения самопроизвольных обрывов [6,7]. Диафрагмирование сетки было применено нами для гарантированной реализации в дуге с катодным пятном режимов „обрывного гашения“, когда подачей отрицательного импульса напряжения на сетку в плоскости сетки создаются условия для самопроизвольного обрыва тока [8,9]. Такие режимы более эффективны для коммутации и работают в более широком диапазоне давлений, что представлялось очень важным из-за наличия катодной струи в разряде с катодным пятном. Катодная струя, несущая достаточно большое количество плазмы и нейтральных атомов материала катода (в нашем случае цезия), является основным препятствием для гашения разряда сеткой. Именно для уменьшения влияния струи расстояние катод–сетка было выбрано относительно большим ($\sim 1 \text{ cm}$), а анодно-сеточный узел располагался под углом 90° к катоду, чтобы до него доходила только периферийная часть струи (рис. 1, б).

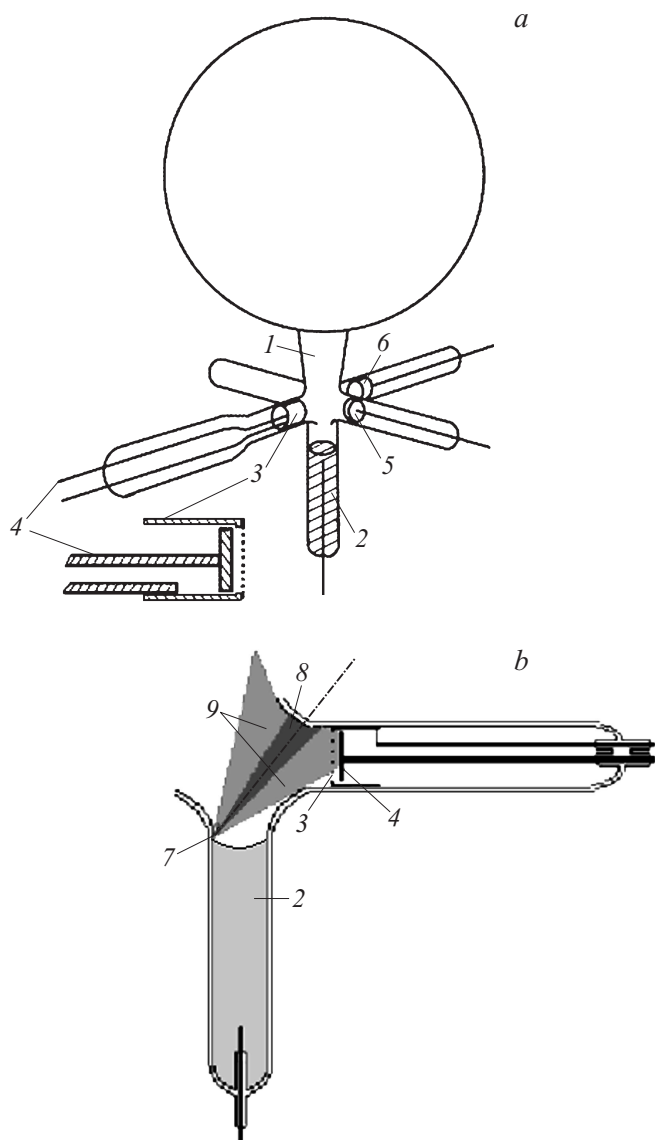


Рис. 1. Экспериментальный прибор (а) и схематическое изображение катодной струи (b). 1 — стеклянный корпус прибора, 2 — жидкометаллический (цезиевый) катод, 3 — сетка на оправке (диаметр молибденовой проволоки 0.03 mm, шаг 0.18 mm), 4 — анод, 5 — дополнительный анод, 6 — вспомогательный электрод, 7 — катодное пятно, 8 — катодная струя, 9 — периферия катодной струи.

Полученный результат — ограничение тока на низком уровне и сильная зависимость предельного тока от давления цезия во внешней колбе — прямо указывал на то, что мы переоценили возможный вклад катодной струи, и в использованной геометрии он оказался незначительным. Это определило очевидный путь увеличения коммутируемых токов в следующем приборе — отказ от диафрагмы.

2. Конструкция прибора помимо отказа от диафрагмирования сетки претерпела и другие изменения (рис. 1, а). Основу корпуса прибора, как и ранее, составляла колба, демпфирующая колебания давления цезия за счет вы-

носа капле с катодной струей, емкостью $\sim 1000 \text{ cm}^3$. Но так как в процессе работы было установлено, что амплитуда поджигающего высоковольтного отрицательного импульса, подаваемого на катод (до 3 kV), достаточна для поджига катодного пятна и без предварительного зажигания вспомогательного термоэмиссионного разряда, создающего над поверхностью основного катода инициирующую пятно плазму [2], естественно было не использовать такой разряд и не вводить в прибор соответствующие электроды, что сильно упростило конструкцию. Кроме того, поскольку опыт показал, что в наших условиях пятно, как правило, зажигается не на кромке жидкого цезия вокруг молибденового штыря (как это имеет место для ртути), а в месте контакта цезия со стеклянной ампулой (и перемещается по кромке мениска), было решено впаивать в катодный штенгель короткий молибденовый ввод только для контакта с жидким цезием. На рисунке не показана ампула с цезием, откуда цезий после вскрытия ампулы и отпайки прибора перегонялся в катодный штенгель. При работе ключа штенгель помещался в отдельный небольшой термостат, его температура определяла равновесное давление паров цезия во всем приборе (она регулировалась и стабилизировалась с точностью $\sim \pm 1 \text{ K}$).

Методика измерений также осталась импульсной, практически такой же, как и в [1,2]. Регулируемая балластная нагрузка R_a включалась в цепь анода (рис. 2), через нее на анод подавалось коммутируемое напряжение $E_a = (10-130) \text{ V}$ в виде импульса длительностью до $400 \mu\text{s}$. Через $\sim 10 \mu\text{s}$ после начала этого импульса на

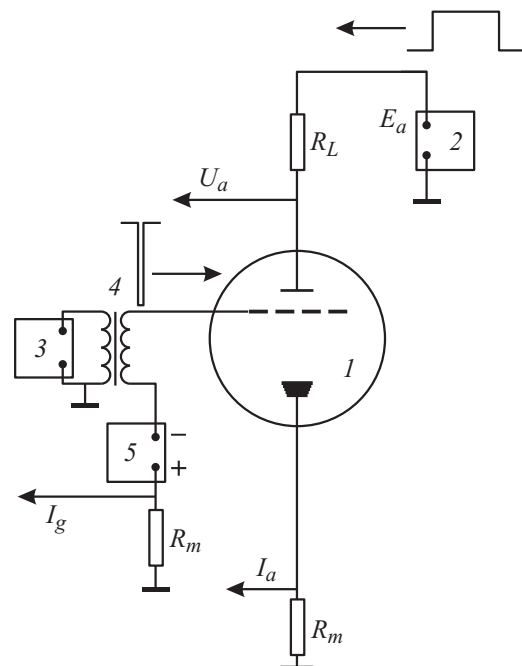


Рис. 2. Электрическая схема испытаний прибора. 1 — жидкометаллический катод, 2 — генератор импульса анодного (коммутируемого) напряжения, 3 — генератор сеточного импульса, 4 — импульсный трансформатор, 5 — источник постоянного сеточного смещения.

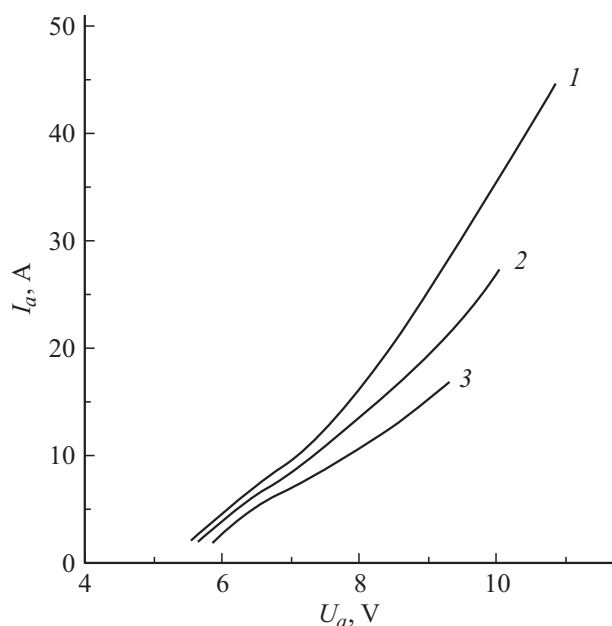


Рис. 3. Типичные ВАХ разряда с катодным пятном. P_{Cs} , Торг: 1 — $8 \cdot 10^{-3}$, 2 — $4.4 \cdot 10^{-3}$, 3 — $2.7 \cdot 10^{-3}$.

жидкометаллическом катоде 1 (см. также рис. 1) инициировалось катодное пятно, что приводило к появлению тока основного разряда. (Вопрос инициирования пятна составляет предмет отдельного рассмотрения и не затрагивается в этой работе.) Весь этот ток проходил сквозь управляющую сетку и замыкался на анод 4 (рис. 1). В выбранный момент основного импульса (с задержкой от 0 до $400 \mu s$, обычно в его конце для достижения равновесного состояния разряда) на сетку, постоянный отрицательный потенциал которой относительно катода регулировался в пределах нескольких вольт источником смещения б, подавался гасящий импульс длительностью от 10 до $23 \mu s$ и фронтом $0.1 \mu s$, с регулируемой амплитудой до $-60 V$. Временные зависимости анодного тока и напряжения, а также сеточного тока снимались на осциллографе.

3. Первоначально нами были подробно исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда для определения области ограничения токов. Оказалось, что для всего исследованного диапазона давлений $P_{Cs} = (1-8) \cdot 10^{-3}$ Торг ограничения токов не наблюдалось — вплоть до $50-70 A$ (что при площади сетки $\sim 1 cm^2$ соответствует такой же плотности тока в плоскости сетки $j_a \approx 50-70 A/cm^2$), в то время как для диафрагмированной сетки ограничения наступали уже при амперных токах и давлениях $P_{Cs} = (6-14) \cdot 10^{-3}$ Торг [2]. Типичные ВАХ для области рабочих токов приведены на рис. 3. Так как площадь сетки при этом по сравнению с предыдущим прибором увеличилась (а плотность тока в ее плоскости соответственно уменьшилась) на порядок, такой результат прямо указывает на то, что вклад катодной струи в концентрацию атомов цезия в области сетки существенно возрос в результате изменения геометрии прибора.

Чтобы получить дополнительное подтверждение этому, были измерены ВАХ при различных уровнях жидкой фазы, где формировалось катодное пятно. Уровень цезия по существу определяет угол между осью катодной струи и плоскостью сетки (рис. 1), и в конечном счете количество тяжелой компоненты, поставляемой в критическую для токопрохождения область разряда. Оказалось, что положение уровня действительно заметно влияет на ВАХ, более того, при низких давлениях и низком уровне цезия разряд теряет устойчивость при достижении некоторого уровня тока. Это проявляется в том, что возникают кратковременные, порядка микросекунд, самопроизвольные уменьшения тока, приводящие к значительным увеличениям анодного напряжения, поскольку сопротивление нагрузки в анодной цепи было велико. Такие неустойчивости возникают не в каждом импульсе, что связано, скорее всего, с небольшими изменениями в локализации катодного пятна. Частота появления импульсов с неустойчивостями увеличивается по мере увеличения тока. ВАХ разряда, зарегистрированные методом стробируемого интегрирования, показаны на рис. 4, кривые 1–5, где штрихами показана область, где в отдельных импульсах наблюдается неустойчивость.

Как видно из рис. 4, напряжение в проводящем состоянии и уровень тока, при котором начинаются неустойчивости, заметно зависят от величины сеточного смещения, что свидетельствует о влиянии электрической прозрачности сетки на токопрохождение в этих условиях.

Из рис. 4 также видно (кривая б), что разница ВАХ диодного и триодного режимов оказалась практически такой же, как и на первом приборе. Это означает, что диафрагмирование сетки в разряде с катодным пятном не приводит к заметному дополнительному увеличению прямого падения напряжения, как это имело место для разряда с термоэмиссионным катодом [9].

Исследование режимов с неустойчивым участком позволило получить, подтверждение нашему предположению о том, что обрывы тока, как и в разрядах с

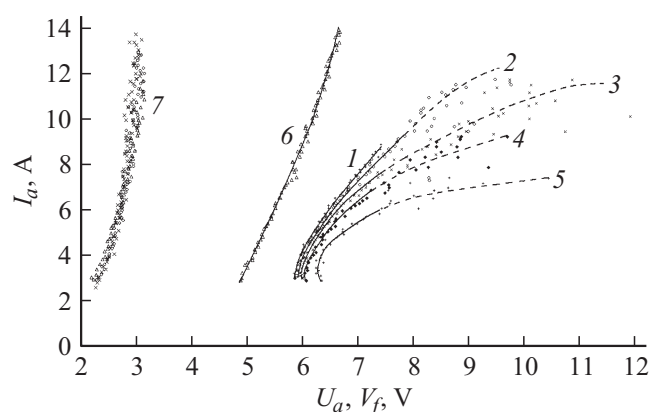


Рис. 4. 1–5 — ВАХ разряда при низком уровне жидкого цезия в катодном штенгеле. $P_{Cs} = (1-1.6) \cdot 10^{-3}$ Торг, напряжение на сетке U_g, V : 1: $+4 V$; 2: $+3 V$; 3: $+2 V$; 4: $+1 V$; 5: $0 V$; 6 — ВАХ разряда на сетку, соединенную с анодом (диодный режим), 7 — величина плавающего потенциала дополнительного анода V_f .

термоэмиссионным катодом [8,9], связаны с достижением критической плотности тока в ячейках сетки и возникновением там ускоряющего электроны скачка потенциала, а не с неустойчивостями, связанными с катодным пятном. Для этого одновременно со снятием ВАХ регистрировался плавающий потенциал дополнительного анода, который играл при этом роль зонда и служил индикатором потенциала плазмы в катодной области. На рис. 4 группа точек 7 включает зависимости плавающего потенциала V_f от тока разряда, соответствующие ВАХ 1 (кружки) и ВАХ 5 (треугольники). Как видно из рисунка, плавающий потенциал плавно меняется с увеличением разрядного тока для всех режимов, включая и область неустойчивости. Это свидетельствует о том, что при обрывах тока имеет место изменение потенциала анодной, а не катодной области. Отметим, что практически такой же была зависимость плавающего потенциала от разрядного тока и при снятии ВАХ в диодном режиме, когда сетка и основной анод замкнуты (крестики).

4. После изучения ВАХ разряда были выполнены подробные исследования эффективности гашения в широком диапазоне токов, коммутируемых напряжений и давлений паров цезия. Оказалось, что для разряда с катодным пятном на приборе с недифрагмированной сеткой четко разделяются режимы инерциального и обрывного гашения.

Как известно [10], при подаче на сетку отрицательного импульса напряжения за счет увеличения ширины ленгмюровских слоев у витков сетки ее электрическая прозрачность уменьшается. Если это уменьшение достаточно велико (амплитуда импульса достаточно большая), уменьшается проходящий ток I_a , что вызывает рост напряжения на аноде U_a за счет уменьшения падения напряжения на нагрузке $I_a R_a$ (поскольку коммутируемое напряжение $E_a = U_a + I_a R_a$); при этом дополнительное напряжение оказывается приложенным в плоскости сетки. Сеточный скачок потенциала формирует пучок электронов, проходящий через сетку из области катод — сетка в область сетка — анод. В анодной области разряда пучок релаксирует по энергии и разогревает электроны плазмы за счет коллективных процессов [11,12], вызывая рост концентрации, стремящийся восстановить токопрохождение в сетке. Однако из-за некоторой инерционности ступенчатой ионизации в определенных условиях (малые остаточные токи, малое коммутируемое напряжение, низкое давление цезия) рост концентрации оказывается недостаточным, и разряд гаснет — реализуется режим гашения, который принято называть инерциальным. Оказалось, что при больших токах, давлениях и концентрациях плазмы возможен и другой режим гашения, когда плотность тока в ячейке сетки становится сопоставимой с плотностью хаотического тока в разрядной плазме и становится возможным возникновение неустойчивостей [8,9].

Как видно из рис. 5, при сравнительно небольших токах ($\sim 1-2$ А), когда концентрация плазмы в разрядном промежутке относительно невелика, при подаче

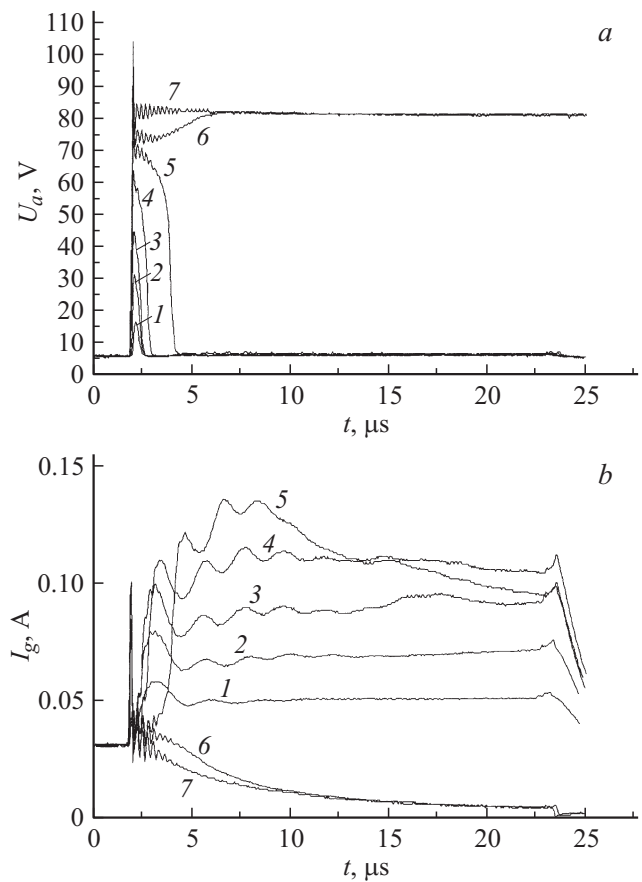


Рис. 5. Осциллограммы анодного напряжения (а) и сеточного тока (б) после подачи на сетку управляющего импульса. $P_{Cs} = 4.4 \cdot 10^{-3}$ Торр, разрядный ток 2 А, коммутируемое напряжение $E_a = 80$ В, амплитуда отрицательных сеточных импульсов $-V_g, V$: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 15, 4 — 20, 5 — 25, 6 — 30, 7 — 40.

больших отрицательных напряжений, вызывающих почти полное начальное запирающее тока (кривые 6 и 7 рис. 5, а), ионизация в области сетка-анод не успевает развиваться, концентрация плазмы там растет незначительно (что наглядно видно на рис. 5, б из элюор сеточного тока, который является хорошим индикатором уровня концентрации плазмы), и разряд гаснет (кривые 7 и 6). При меньших начальных запирающих (кривые 1–5) в области сетка-анод успевает развиваться ионизация, и возрастающая концентрация плазмы отпирает ток — гашения не происходит. Однако при увеличении разрядного тока возможна иная ситуация (рис. 6). При амплитуде сеточного импульса, недостаточной для инерциального гашения, когда рост концентрации в анодной области полностью восстанавливает токопрохождение, через значительное время — порядка нескольких микросекунд и даже десятков микросекунд — наблюдается резкое запирающее тока, которое в этих условиях может иметь только обрывной характер (кривая 5). Гашение в таком случае может сопровождаться развитием колебаний, которые особенно хорошо прослеживаются на осцил-

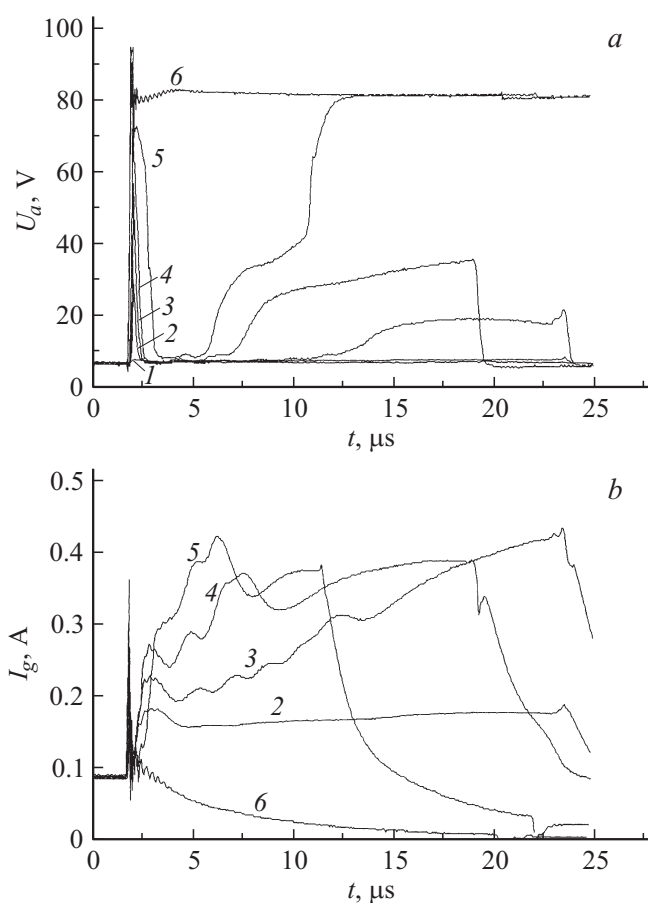


Рис. 6. Осциллограммы анодного напряжения (а) и сеточного тока (б) после подачи на сетку управляющего импульса. $P_{Cs} = 4.4 \cdot 10^{-3}$ Торг, разрядный ток 4 А, $E_a = 80$ В, амплитуда отрицательных сеточных импульсов $-V_g$, В: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40 (длительность сеточного импульса для этой кривой составляла 17 μ s), 5 — 50, 6 — 60.

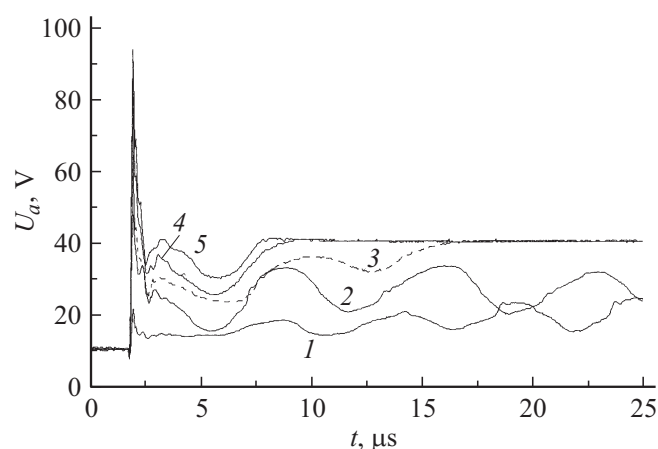


Рис. 7. Осциллограммы анодного напряжения для режима обрывного гашения при большом коммутируемом токе. $P_{Cs} = 2.7 \cdot 10^{-3}$ Торг, разрядный ток 16 А, $E_a = 42$ В, амплитуда отрицательных сеточных импульсов $-V_g$, В: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50.

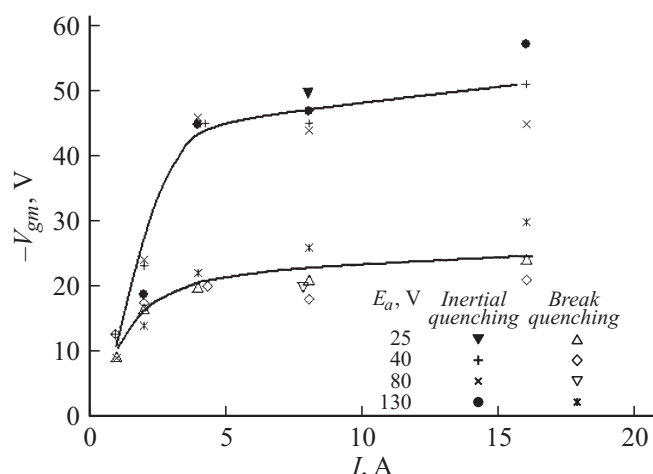


Рис. 8. Зависимость минимальной гасящей амплитуды сеточного импульса $-V_{gm}$ от коммутируемого тока для различных коммутируемых напряжений. 1 — инерциальное гашение, 2 — обрывное гашение. $P_{Cs} = 2.7 \cdot 10^{-3}$ Торг.

лограммах анодного тока при больших коммутируемых токах (рис. 7).

Следует подчеркнуть, что для цезиевых плазменных ключей с термоэмиссионным катодом такие режимы, когда для одной и той же рабочей точки ВАХ, в зависимости от амплитуды сеточного импульса, имеет место и инерциальное, и обрывное гашение, никогда не наблюдались [8,9,13].

5. Разделение инерциальных и обрывных гашений позволило построить зависимость минимальной амплитуды гасящих сеточных импульсов от тока, определяющую эффективность сеточного управления, отдельно для каждого типа гашения. На рис. 8 такая зависимость построена для давления $2.7 \cdot 10^{-3}$ Торг для различных коммутируемых напряжений в диапазоне $E_a = 20-130$ В. Оказалось, что амплитуда очень слабо зависит от коммутируемого напряжения, что хорошо согласуется с результатами, получавшимися для сеточных ключей с термоэмиссионным катодом [9]. Также хорошо согласуется и быстрый рост амплитуды с током в области малых токов. А вот выполаживание этой зависимости при $I_a > 5$ А для инерциального гашения оказалось совершенно неожиданным и представляет очень важную для практики специфику ключа с катодным пятном, не находящую пока своего объяснения.

На рис. 9 представлена эффективность гашения для различных исследованных давлений при $E_a = 80$ В. Быстрое уменьшение эффективности гашения с ростом давления указывает на то, что вклад катодной струи в исследованных условиях все же не слишком велик. При больших давлениях суммарная концентрация тяжелой компоненты (атомов и ионов цезия) в области сетки определяется в основном равновесным давлением, что и обуславливает сильный рост гасящей амплитуды с давлением. Но в области малых давлений струя, видимо, вносит существенный вклад в токопорож-

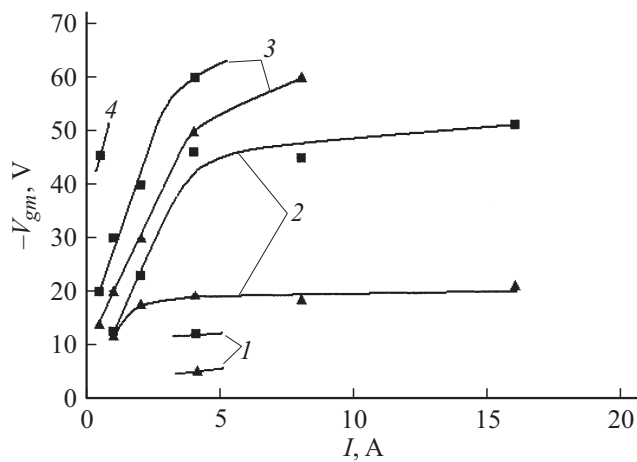


Рис. 9. Зависимость минимальной гасящей амплитуды сеточного импульса $-V_{gm}$ от коммутируемого тока для различных давлений цезия. P_{Cs} , Torr: 1 — $1.6 \cdot 10^{-3}$, 2 — $2.7 \cdot 10^{-3}$, 3 — $4.4 \cdot 10^{-3}$, 4 — $8 \cdot 10^{-3}$. Треугольники — медленное обрывное гашение, квадраты — быстрое инерциальное гашение. $E_a = 80$ V.

дение, коль скоро обеспечиваются большие токи без ограничения, наблюдавшегося при малых углах между направлением катодной струи и плоскостью сетки.

Полученный результат позволяет поставить вопрос о целесообразности выбора такой конфигурации разряда, когда необходимая для переноса тока концентрация тяжелых частиц будет обеспечиваться исключительно катодной струей, и в то же время она не будет слишком высокой в области сетки, чтобы обеспечивать возможность сеточного гашения. В этом случае рабочее равновесное давление цезия может быть совсем низким (практически нулевым), что делает ненужным предварительный разогрев ключа в термостате и стабилизацию его температуры, на порядок упрощая эксплуатацию таких ключей и делая возможным его включение в холодном состоянии. Необходимо только в конструкции прибора обеспечить возврат цезия в охлаждаемый катодный узел и предотвращение замыкания электродов адсорбирующимися на поверхности изоляторов пленками цезия.

6. Как видно из приведенных выше результатов, обрывное гашение в плазменном ключе с катодным пятном получается достаточно эффективным. Однако большая длительность запирающего импульса (микросекунды) снижает практическую значимость такой коммутации. В то же время обрывные гашения на ключах с термоэмиссионным катодом дает то же характерное время запирающего импульса, что и инерциальное гашение [9,13]. Можно предполагать, что причина затягивания гашения на исследованном приборе обусловлена специфическими особенностями его конструкции.

Все исследования условий гашения разряда проводились при значениях отрицательного сеточного импульса до -60 V, при этом во всех режимах наблюдалось заметное первоначальное запирающее действие. Несмотря на это, в

некоторых режимах с предельно большими для прибора токами полное прерывание разрядного тока не наблюдалось при длительности импульса гашения до $20 \mu s$. Типичные осциллограммы изменения анодного напряжения приведены на рис. 9. Как показали измерения для квазистационарного состояния (см. приведенные выше осциллограммы), анодные токи при этом достигают предельных устойчивых значений. В таких режимах плазма находится в предельно ионизованном состоянии (близком к полной ионизации). С другой стороны, наличие значительных первоначальных запирающих токов указывает на то, что значения концентрации плазмы в анодной области разряда при этом невелики. В частности, по расчету ленгмюровских слоев и электрической прозрачности сетки в соответствии с [14] для геометрических параметров используемой сетки значения концентрации должны составлять не более $\sim (1-3)10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при полном перекрытии слоев. Однако, как видно из осциллограмм, ток после первоначального практически полного запирающего импульса (при $V_g = -60$ V, кривая 4) хотя и претерпевает значительные изменения, но полностью не прерывается, и проводящее состояние восстанавливается после окончания сеточного импульса.

Отсутствие гашения в таких режимах может быть связано с тем, что после начального запирающего импульса генерация ионов не только резко увеличивается в кнудсеновском промежутке между сеткой и анодом, но и возникает в пространстве за анодом. Такое распространение области разряда обусловлено значительным разогревом электронов при больших значениях энергии инжектированного в плазму пучка во время протекания нестационарного процесса после подачи запирающего сеточного импульса. В пользу такого предположения говорит тот факт, что при протекании длительных ($20 \mu s$) нестационарных процессов наблюдалось свечение во всем анодном штенгеле прибора. Плазма в этой области является столкновительной и характерное время ее распада более

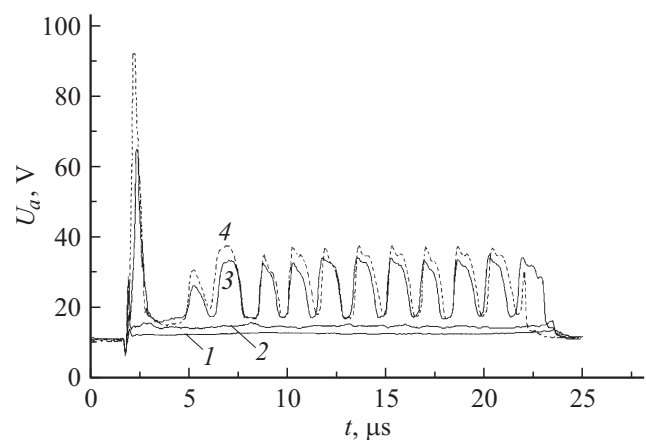


Рис. 10. Осциллограммы анодного напряжения при отсутствии гашения при больших коммутируемых токах. $P_{Cs} = 2.7 \cdot 10^{-3}$ Torr, разрядный ток 30 A, $E_a = 80$ V, амплитуда отрицательных сеточных импульсов $-V_g$, V: 1 — 20, 2 — 30, 3 — 40, 4 — 60.

чем на порядок превышает время распада для кнудсеновского промежутка. Наличие такой плазмы на периферии разряда препятствует полному прерыванию тока.

Следует отметить, что сложный характер обмена тяжелой компонентой между катодной областью разряда и анодной в условиях, когда плазма сильно ионизована и обмен происходит только через сетку, был отмечен и на предшествующем приборе. После поджига разряда при отрицательном сеточном смещении поток ионов из катодной области в анодную задерживается, в результате чего происходит „откачка“ цезия из анодного штенгеля [2]. Так как запас цезия в анодном штенгеле достаточно велик (его объем составлял несколько см³), установление равновесного состояния разряда сильно затягивалось — в ряде режимов оно не достигалось даже за всю длительность анодного импульса (400 μs). Понятно, что ионизация такого количества атомов цезия должна существенно способствовать восстановлению токопрохождения даже после значительного запираения тока.

7. В заключение можно констатировать, что отказ от диафрагмирования сетки существенно улучшил работу плазменного ключа на разряде с катодным пятном, обеспечив увеличение полных управляемых токов практически на порядок (до 20 А/см²) и почти вдвое (до 130 В) коммутируемого напряжения. Проведенные измерения эффективности сеточного управления в диапазоне разрядных токов 0,5–30 А и давлений цезия $(1.5–8) \cdot 10^{-3}$ Торр, не исследовавшемся ранее для цезиевых плазменных ключей с термоэмиссионным катодом, позволили впервые четко разделить области инерциального и обрывного гашений и определить условия их реализации. Установленные закономерности и особенности гашения разряда с катодным пятном позволяют наметить основные пути в совершенствовании конструкции ключа, направленные на дальнейшее увеличение коммутируемых токов и напряжений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-01157-а).

Список литературы

- [1] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Столяров И.И. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 5. С. 86–93.
- [2] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Столяров И.И. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 11. С. 40–47.
- [3] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Столяров И.И. // Матер. Всероссийской конф. „Физика низкотемпературной плазмы — 2011“. 2011. Т. 1. С. 160–167.
- [4] Ярыгин В.И. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2013. № 2. С. 5–27.
- [5] Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М., Столяров И.И. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 15–21.
- [6] Stangeby P.C., Allen J.E. // J. Phys. D. 1973. Vol. 6. P. 224–236.
- [7] Незлин М.В. Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 5. С. 1048–1055.
- [8] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев А.С. и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 3. С. 567–572.
- [9] Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 12. С. 21–38.
- [10] Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С.152–162.
- [11] Иванов А.А., Соболева Т.К., Юшманов П.Н. // Физика плазмы. 1977. Т. 3. Вып. 1. С. 547–549.
- [12] Бакиит Ф.Г., Костин А.А., Марциновский А.М. и др. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 3. С. 547–549.
- [13] Воронин С.В. // Автореф. канд. дисс. 2000. СПбГПУ.
- [14] Бакиит Ф.Г., Колосов Б.И., Костин А.А. и др. // „Математическое моделирование процессов в низковольтном плазменно-пучковом разряде“. М.: Энергоатомиздат, 1990.