

04;12

Сеточное управление током в разряде с катодным пятном

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

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

Поступило в Редакцию 27 октября 2009 г.

Приведены первые результаты исследования полного ключевого управления током (поджиг и гашение) в разряде с катодным пятном на жидком цезии с помощью мелкоструктурной сетки, подтверждающие возможность реализации такого управления при плотностях тока $5\text{--}25\text{ A/cm}^2$ в плоскости сетки.

Плазменные ключи с полным сеточным управлением (ПКС) были разработаны в 70-х годах для инвертирования выходного постоянного напряжения ($\sim 10\text{--}100\text{ V}$) термоэмиссионных реакторов-преобразователей для космических энергоустановок. Было реализовано гашение кнудсеновской цезиевой низковольтной дуги отрицательным сеточным импульсом при токах $\sim 1\text{--}10\text{ A/cm}^2$ при прямых падениях напряжения на ПКС всего $1.5\text{--}2\text{ V}$ [1,2].

ПКС могли бы найти и наземное применение, в первую очередь для экстремальных условий с высоким уровнем радиации и окружающей температуры, при увеличении коммутируемых разрядных токов. Поэтому возникла идея снять ограничение тока, связанное с ограничением верхнего предела рабочих давлений цезия, используя разряд с катодным пятном на жидком цезии. Катодное пятно, в принципе, может исключить и необходимость предварительного разогрева корпуса прибора, оно решает и непростой вопрос подавления термоэмиссии сетки. Эти преимущества достигаются за счет сравнительно небольшого увеличения прямого падения, поскольку катодное пятно на цезии поддерживается при минимальных напряжениях $\sim 5\text{ V}$. Разработка таких ключей упиралась в проблему гашения сеткой разряда при наличии катодной струи цезия, создающей дополнительную концентрацию атомов и ионов. Первоначально такая задача казалась даже невыполнимой. Однако надежду на успех давало отсутствие ограничения на максимальный ток с катода при наличии катодных пятен, что делало возможным

реализацию обрывного гашения, значительно менее чувствительного к давлению паров цезия.

Исследования кинетики сеточного гашения позволили установить существование двух различных по своей физической природе механизмов сеточного гашения [1,3,4]. Первый механизм связан с тем, что при подаче импульса на сетку за счет расширения ленгмюровских слоев у ее витков происходит частичное запираение тока, что вызывает появление скачка потенциала в плоскости сетки. Это резко увеличивает температуру электронов и ступенчатую генерацию ионов в области сетка–анод, стремящуюся восстановить токопрохождение. Если давление цезия не превышает $0.01\text{--}0.02\text{ Torr}$, при достаточно большой амплитуде сеточного импульса (десятки вольт) и коротком фронте ($\sim 0.1\ \mu\text{s}$) нарастание концентрации в анодной области из-за инерционности ступенчатой генерации может не успевать компенсировать рассасывание плазмы в катодной области после начального запираения тока, и разряд гаснет даже при большом (до $\sim 10\ \text{A/cm}^2$) исходном разрядном токе. В противном случае ток после начального запираения восстанавливается, и гашения не происходит. Однако при плотностях разрядного тока порядка хаотического тока плазмы при предельной степени ионизации атомов наполнения гашение разряда сеткой снова реализуется за счет известного явления самопроизвольного обрыва тока („обрывное гашение“). Уменьшение проницаемости сетки после подачи на нее отрицательного импульса приближает плотность тока в ее ячейках к хаотическому току плазмы, это вызывает неустойчивость токопрохождения и прерывание тока [3,4].

Конструкция разработанного нами экспериментального прибора для попытки реализации сеточного управления приведена на рис. 1. Его особенностями, по сравнению с традиционными плазменными ключами, являются большое расстояние между катодом и управляющей сеткой ($\sim 1\text{--}2\ \text{cm}$) и боковое по отношению к поверхности катода расположение анодно-сеточного узла для уменьшения влияния катодной струи на разряд в области сетки. При предполагаемой концентрации атомов цезия в катодной области $\sim 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ длина свободного пробега иона составляет $\sim 1\ \text{mm}$. Поэтому в нашем случае катодная область не является кнудсеновской, и время рассасывания плазмы после прерывания тока может достигать сотен микросекунд. При обычно применяемых для гашения сеточных импульсах длительностью $\sim 10\ \mu\text{s}$ это привело бы к восстановлению тока при термоэмиссионном разряде. Однако в

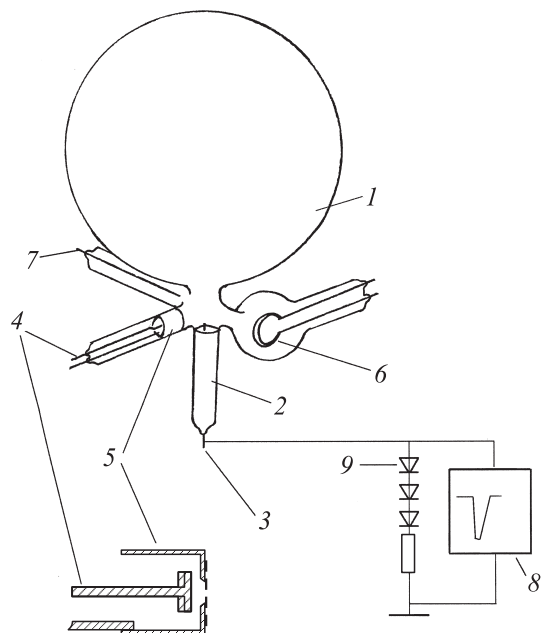


Рис. 1. Конструкция прибора и схема поджига: 1 — колба, 2 — отросток с жидким катодом, 3 — токоввод катода, 4 — анод основного разряда, 5 — диафрагма с сеткой, 6 — катод вспомогательного разряда, 7 — анод вспомогательного разряда, 8 — генератор отрицательных импульсов поджига разряда с пятном, 9 — вентили.

предлагаемом приборе восстановления тока не должно происходить из-за малого времени жизни катодных пятен после прерывания тока.

Стеклянная колба 1 имела шарообразную верхнюю часть объемом $\sim 1000 \text{ см}^3$, которая должна была демпфировать колебания давления в приборе при возможном вылете капель цезия из катодного пятна. Весь прибор помещался в термостат, температура которого была на 25–50 К выше температуры стеклянного отростка с жидким цезиевым катодом 2. Температура этого отростка, помещенного в отдельный термостат, стабилизировалась с точностью $\sim 0.2 \text{ К}$ и определяла исходное давление паров Cs в приборе. Длинный молибденовый токоввод катода 3 при заполнении отростка цезием выступал над поверхностью цезия на

3–5 mm. Подобная мера применяется в ртутных выпрямителях для локализации катодного пятна на границе двух металлов и существенного уменьшения массового расхода жидкого металла из пятна. В отдельные отростки были впаяны катод и анод вспомогательного разряда, а также анодно-сеточный узел основного разряда, конструкция которого показана на рис. 1. Анод 4 представлял собой диск из никеля диаметром ~ 4 mm. Молибденовая диафрагма 5 диаметром 8 mm имела в центре отверстие диаметром 3 mm, затянутое плетеной проволочной сеткой с диаметром проволоки 0.03 mm и шагом 0.18 mm. Наличие диафрагмы позволило на порядок снизить ток пятна при достижении высоких плотностей тока в плоскости сетки, поскольку был неизвестен массовый расход цезия из катодного пятна в наших условиях. Расстояние между сеткой и анодом составляло 1 mm, как в обычных плазменных ключах. Охранный цилиндр диафрагмы по диаметру совпадал с внутренним размером стеклянного отростка, что должно было гарантировать отсутствие огибающего паразитного разряда между катодом и анодом.

Испытания прибора проводились в импульсном режиме. Между прямонакальным катодом 6 и анодом 7 поджигался вспомогательный импульсный периодический термоэмиссионный разряд при давлении $\sim 10^{-2}$ Torr с частотой 10–20 Hz и длительностью импульса 10–100 μ s. Наличие плазмы позволяло снизить напряжение поджига дуги с пятном до ~ 1 –2 kV [5]. В конце действия импульса термоэмиссионного разряда на жидкометаллический катод 2 подавался короткий импульс отрицательной полярности ~ 1 –3 kV, приводящий к пробое, возникновению катодного пятна, отпиранию вентилей 9 и появлению тока основного разряда. Весь этот ток проходил через управляющую сетку и замыкался на анод 4. Длительность импульса основного разряда составляла до 400 μ s.

Несмотря на наличие молибденового штыря, выступающего над поверхностью цезия, катодное пятно всегда возникало на границе жидкого цезия и поверхности стеклянного отростка и при горении разряда осуществляло движение по этой границе. При исходном давлении $0.6 \cdot 10^{-2}$ Torr минимальное значение устойчивого разрядного тока составляло ~ 0.25 A. Вольт-амперная характеристика основного разряда при исходном давлении цезия $0.6 \cdot 10^{-2}$ Torr показана на рис. 2, а (кривая 1). Благодаря хорошей воспроизводимости результатов от импульса к импульсу измерения проводились методом стробированного интегрирования. Измеренные значения токов и напряжений

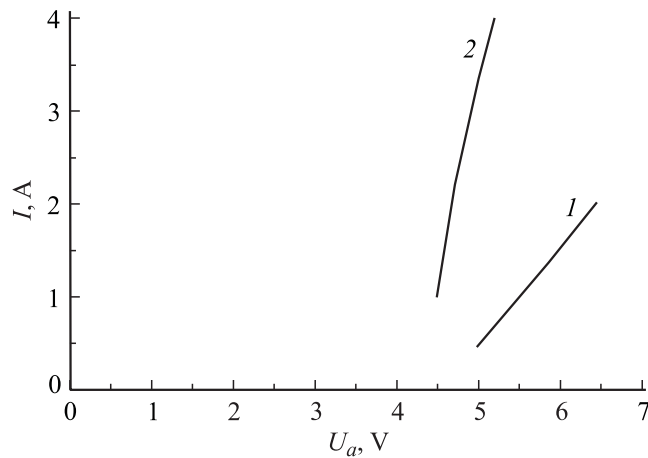


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда при давлении $0.6 \cdot 10^{-2}$ Торр. 1 — для триода, 2 — для диода.

соответствуют задержке $400 \mu\text{s}$ после поджига разряда с пятном. Для сравнения приведена характеристика разряда, в котором в качестве анода использовалась диафрагма с сеткой.

Во всем диапазоне токов кривой 1 рис. 2 наблюдалось гашение разряда прямоугольными импульсами отрицательного напряжения, подаваемыми на сетку. Импульсы имели длительность $10 \mu\text{s}$, фронт $0.1 \mu\text{s}$, величину до 50 V и задержку гасящего импульса относительно момента поджига разряда до $400 \mu\text{s}$. Напряжение источника анодного питания E_a составляло до 100 V . Примеры осциллограмм напряжения на аноде после подачи сеточного импульса при разных значениях запирающего напряжения приведены на рис. 3. Пунктиром показано значение напряжения анодного питания. Кривая 4 соответствует гашению разряда, а остальные — восстановлению тока после окончания сеточного импульса. На рис. 3 приведена зависимость величины гасящего сеточного напряжения от величины тока разряда при $E_a = 88 \text{ V}$. На кривой виден характерный максимум, связанный со сменой механизма гашения, который наблюдался в работе [4]. Рост гасящего сеточного напряжения с ростом тока разряда в области малых значений тока связан с увеличением концентрации плазмы в анодной области раз-

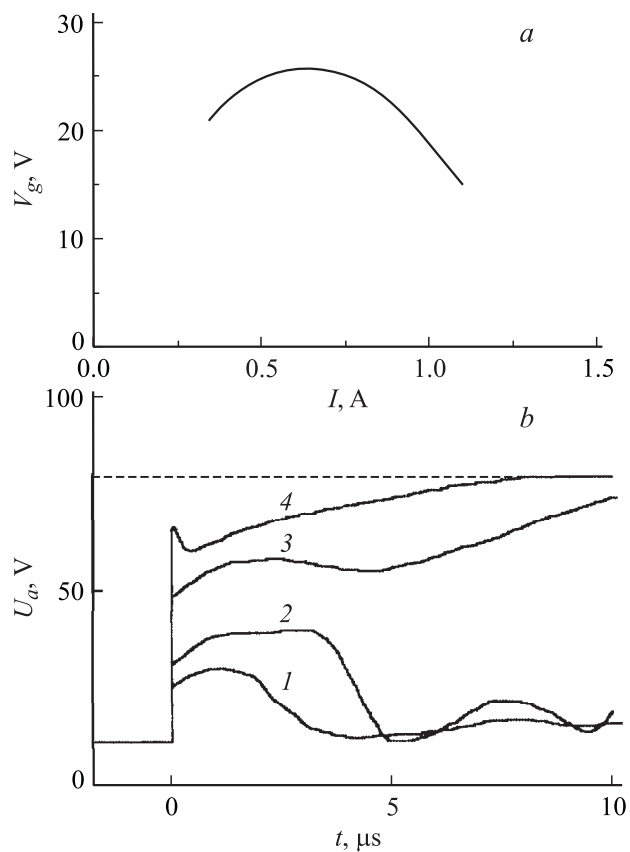


Рис. 3. *a* — зависимость гасящего сеточного напряжения от коммутируемого тока; *b* — осциллограммы анодного напряжения для разных значений управляющего напряжения: кривые 1–4 соответствуют 5,6, 8,0, 19,2, 30,4 В.

ряда в стационарном проводящем состоянии и соответственно менее значительным влиянием сеточного импульса на ленгмюровские слои и электрическую прозрачность сетки. Уменьшение значения гасящего сеточного напряжения при увеличении тока разряда в области больших плотностей тока связано с приближением к точке самопроизвольного обрыва тока.

Ограничение верхнего значения тока на кривой 1 рис. 2 значением 2 А связано с возникновением самопроизвольных обрывов тока через $400 \mu\text{s}$ после начала импульса. Соответствующее значение плотности тока в плоскости сетки составляет 28 A/cm^2 . Возникновение самопроизвольных обрывов тока обычно связывается с достижением в анодной области разряда состояния с полностью ионизованной плазмой (или близкого к такому состоянию). Необходимая для такого состояния температура электронов в анодной области достигается благодаря инжекции электронного пучка из катодной области, ускоренного на скачке потенциала в плоскости сетки, и его релаксации. Разумно предположить, что для такого режима выполняется критерий Ленгмюра [6] для плотности электронного тока j_e из катодной области в анодную и ионного j_i в противоположном направлении: $j_e/j_i = (M/m)^{1/2}$, где M и m — массы иона и электрона соответственно. Этот критерий точно выполняется для случаев, когда две плазмы разделены слоем пространственного заряда, а начальные энергии частиц намного меньше величины энергии, приобретаемой заряженными частицами при прохождении слоя. Хотя последнее условие может быть не выполнено строго, можно оценить концентрацию плазмы в анодной области для этих режимов, считая j_i ионным током насыщения для плазмы анодной области, а значение электронной температуры в анодной области взять равным 1 eV , опираясь на результаты многочисленных исследований в приборах с термоэмиссионными катодами, тем более что оно слабо влияет на точность результата. Если электрическую прозрачность сетки определять в соответствии с [2,7], то концентрация составляет $1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ для значения разрядного тока 2 А, а соответствующее значение прозрачности 0.47. Заметим, что исходная концентрация атомов цезия при отсутствии разряда для давления $0.6 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ составляет $\sim 1.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, причем это значение определяется по температуре термостата цезиевого резервуара и может быть заниженным. Приведенное оценочное значение концентрации плазмы хорошо соответствует самому факту хорошей управляемости разряда при подаче на сетку отрицательного импульса, что видно из осциллограмм рис. 3, *b*. Управляющее напряжение подавалось на сетку через $100 \mu\text{s}$ после поджига разряда. Половинному первоначальному запирающему току по расчету в соответствии с [7] при приведенном значении концентрации плазмы соответствует значение падения потенциала на ленгмюровском слое у витка сетки, равное 34 В. Неизвестное значение электронной температуры T_e в расчете было принято равным 1 eV , что допустимо,

поскольку величина падения потенциала слабо зависит от T_e ($\sim T_e^{1/3}$). Кривой 2 рис. 3, *b* соответствует половинное первоначальное запирающее напряжение относительно тока при величине импульса сеточного напряжения относительно общего провода схемы -8 В . При этом разность потенциалов между сеткой и анодом по данным эксперимента равна 51 В , что неплохо согласуется с приведенным расчетным значением, которое представляет собой разность потенциалов между сеткой и плазмой анодной области разряда.

Полученные результаты показывают, что в исследованном диапазоне токов влияние катодной струи на эффективность гашения разряда невелика, и сеточное управление может быть достигнуто в широком диапазоне токов при параметрах управляющего сеточного импульса, которые используются для гашения в ключах с термоэмиссионными катодами.

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

Список литературы

- [1] Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 42. В. 2. С. 274–296.
- [2] Бахит Ф.Г., Каплан В.Б., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1978. Т. 43. В. 11. С. 2273–2296.
- [3] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев А.С. и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49. В. 3. С. 567.
- [4] Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 12. С. 21–38.
- [5] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Столяров И.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 6. С. 91–93.
- [6] Langmuir I. // Phys. Rev. 1929. V. 33. P. 954.
- [7] Бахит Ф.Г., Колосов Б.И., Костин А.А. и др. // Математическое моделирование процессов в низковольтном плазменно-пучковом разряде. М.: Энергоатомиздат, 1990.