

# ГЕНЕРАТОРЫ МОЩНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ОТПАЯННЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ КАМЕР С ПОЛЫМ КАТОДОМ

Д. В. Вялых, А. Е. Дубинов, И. Л. Львов, С. А. Садовой, И. Ю. Корнилова, В. С. Жданов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В импульсных высоковольтных разрядах низкого давления в газоразрядных камерах с полым катодом может происходить полная модуляция разрядного тока на частоте, близкой к ионной плазменной частоте. Это явление можно использовать для генерации мощных высокочастотных (ВЧ-) импульсов.

Статьи [1–3] группы из «Технион» (Израиль) представляют результаты первых разработок и исследований мощных генераторов ВЧ-импульсов на основе газоразрядных камер с полым катодом. Лучшие их результаты, полученные, конечно же, в разных режимах таковы: максимальная длительность ВЧ-импульсов 11,5 мкс, их максимальная мощность 121 кВт, ВЧ-частота 35–39 МГц, частота следования импульсов – до 100 Гц (Xe, при давлении 19–21 мТор).

Статья [4] группы из РФЯЦ-ВНИИЭФ [5] (Россия) представляет широкий обзор исследований, направленных на улучшение характеристик генераторов ВЧ-импульсов с полым катодом и на уточнение физических механизмов их работы. В ней описано целое семейство газоразрядных камер с разными размерами. На одной из них (DC-VIm) при использовании воздуха в качестве рабочей среды были получены следующие результаты (также в разных режимах): максимальная длительность ВЧ-импульсов 1,8 мкс, мощность 8 МВт, ВЧ-частота 100–140 МГц, частота следования импульсов – до 1 кГц.

Одним из факторов, ограничивающих применимость описанных в [1–4] генераторов, является наличие вакуумной системы (форвакуумный баллон и насос) и системы напуска газа и контроля его давления в камере. Применение отпаянных газоразрядных камер позволяет отказаться от использования вакуумной и газовых систем и, следовательно, значительно уменьшить габариты генераторов и обеспечить их портативность. Цель данной работы – создать отпаянные газоразрядные камеры с полым катодом и исследовать их работу в составе мощных генераторов ВЧ-импульсов.

Новые камеры были разработаны в РФЯЦ-ВНИИЭФ и изготовлены в ООО «Импульсные технологии» [6] (Россия). Внешний вид и внутренняя структура камер показана на рис. 1. За основу их геометрии была взята геометрия DC-VIm [4], а в качестве рабочих газов –  $H_2$  или  $N_2$ . Источники соответствующих газов были установлены в заанодной области.

Используемый источник  $H_2$  представляет собой цилиндрический элемент, изготовленный из мелкодисперсного спеченного Ti и снабженный омическим нагревателем (аналогичные источники описаны в [7]).

При нагревании в вакууме выше 800 °C Ti активируется и выделяет  $H_2$ . При остывании ниже 300 °C элемент снова поглощает  $H_2$ , переходя в твердый раствор гидрида титана Ti-H в  $\alpha$ -Ti. Таким образом, титановый источник  $H_2$  является возобновляемым источником.

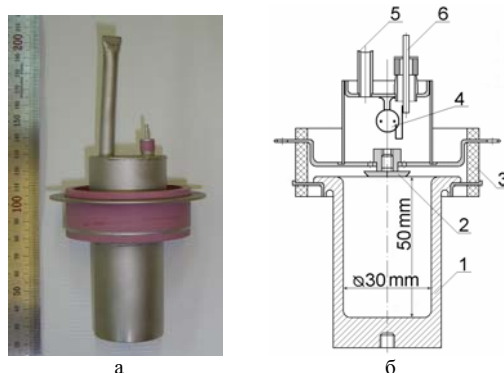


Рис. 1. Отпаянная газоразрядная камера: а) – ее фото (шкала слева – в мм); б) – ее конструкция: 1 – полый катод; 2 – анод; 3 – керамический изолятор; 4 – источник газа; 5 – запаянный патрубок для откачки; 6 – контакт для тока накала для источника газа

Источник  $N_2$  представляет собой элемент, выполненный из полупроводника  $Cu_3N$ . При пропускании через него электрического тока элемент нагревается и при температуре выше 450 °C химически разлагается с выделением  $N_2$ . Фактически, источник  $N_2$  является невозобновляемым источником.

Время подготовки камер к работе после включения нагревателей в обоих случаях составляет не более 5 мин.

Каждая камера включалась в электрическую цепь генератора, содержащую блок зарядки постоянным током, зарядный конденсатор емкостью 0,22 мкФ, активную нагрузку в виде резистора, который был подключен к камере через разделительный конденсатор емкостью 3300 пФ.

Работает генератор следующим образом. После включения блока зарядки напряжение на зарядном конденсаторе растет. В момент достижения напряжения на конденсаторе величины, достаточного для самопробоя и зависящей от давления, в камере развивается разряд с полым катодом. В результате неустойчивости разряда, ток, протекающий по плазме, модулируется. Это приводит к формированию в нагрузке ВЧ-импульса большой мощности. Типичная осциллограмма ВЧ-импульса показана на рис. 2.

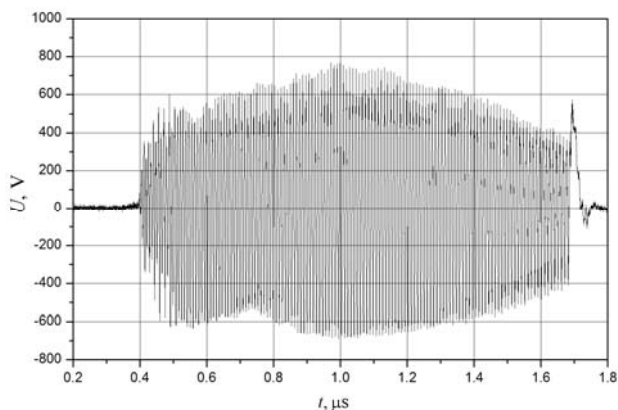


Рис. 2. Пример оциллограммы напряжения на активной нагрузке (получена на нагрузке 3 Ом при использовании газоразрядной камеры, снабженной источником  $N_2$ )

Измерения электротехнических характеристик генератора с камеры, заполненной  $H_2$ , проводились в режиме однократных импульсов. Изменяя ток нагревателя в источнике  $H_2$ , получали различные значения давления газа в камере и, соответственно, различные значения напряжения самопробоя. На рис. 3 представлены характеристики генератора с  $H_2$ . Они похожи на характеристики генераторов с газоразрядными камерами, заполненными воздухом из статьи [4]. Видно, что по мере роста напряжения самопробоя увеличивается выходная действующая мощность, но падает длительность ВЧ-импульса. При этом выходная мощность в  $\sim 3$  раза меньше, чем для воздуха. В [3] показано, что чем массивнее ионы рабочего газа в камере, тем выше эффективность ВЧ-генерации. Настоящие данные также согласуются с этой тенденцией.

Аналогичные характеристики для генератора с  $N_2$  показаны на рис. 4. Они также подтверждают, что тяжелые газы дают большую мощность ВЧ-генерации, чем легкие газы.

В [1] получено, что частота генерации зависит от сорта газа: она уменьшается с ростом массы ионов. Полученные здесь и в [4] данные измерений не подтверждают этот факт: для обеих камер ( $H_2$  и  $N_2$ ), а также для камеры DC-VIm [4], которая была заполнена воздухом, частоты генерации существенно не различались друг от друга и составляли примерно 120 МГц.

С целью определения ресурса камер исследовалась их работа в импульсно-периодическом режиме. Для камеры с  $H_2$  частота следования импульсов устанавливалась величиной 100 Гц. Для работы в этом режиме, с тем, чтобы напряжение самопробоя было 5 кВ, был подобран необходимый ток накала источника  $H_2$ . После  $\sim 1$  ч суммарной работы сериями по 30 с (требовалось примерно 5 мин для воздушного самоохлаждения стенок камеры), т. е. после 120 серий, электротехнические характеристики ВЧ-генератора не изменились. Можно ожидать, что принудительное водяное охлаждение камеры позволит отказаться от 5-минутных перерывов.

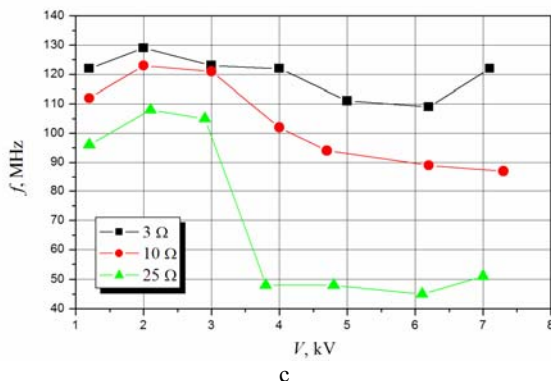
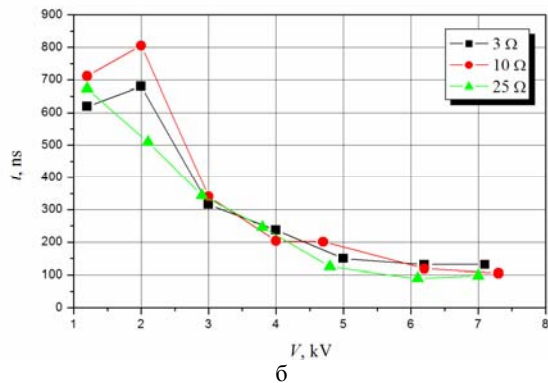
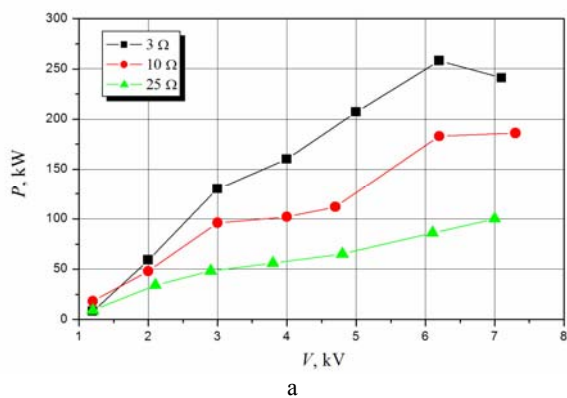


Рис. 3. Характеристики ВЧ-генератора на основе камеры с  $H_2$  (зависимости от напряжения самопробоя): а – действующая ВЧ-мощность на активной нагрузке; б – длительность генерации; в – частота генерации в зависимости для различных значений сопротивления нагрузки

Ресурсные исследования камеры с  $N_2$  также проводились в импульсно-периодическом режиме с частотой 100 Гц при постоянном питании источника  $N_2$ . После суммарных 10 мин работы сериями по 30 с ВЧ-генерация полностью прекратилась, т. к. существенно снизилось напряжение самопробоя (с 5 кВ до 500 В). Для выяснения причины этого снижения камера с  $N_2$  была вскрыта. Разрез был осуществлен перпендикулярно образующей изолятора. Визуальный осмотр позволил выявить эту причину: на внутренней поверхности изолятора появился металлический налет, из-за которого и происходило снижение электропрочности изолятора. В экспериментах с воздухом [4] подобное снижение никогда не наблюда-

лось, при этом некоторые газоразрядные камеры суммарно в импульсно-периодическом режиме (частота до 1 кГц) работали более 1 ч.

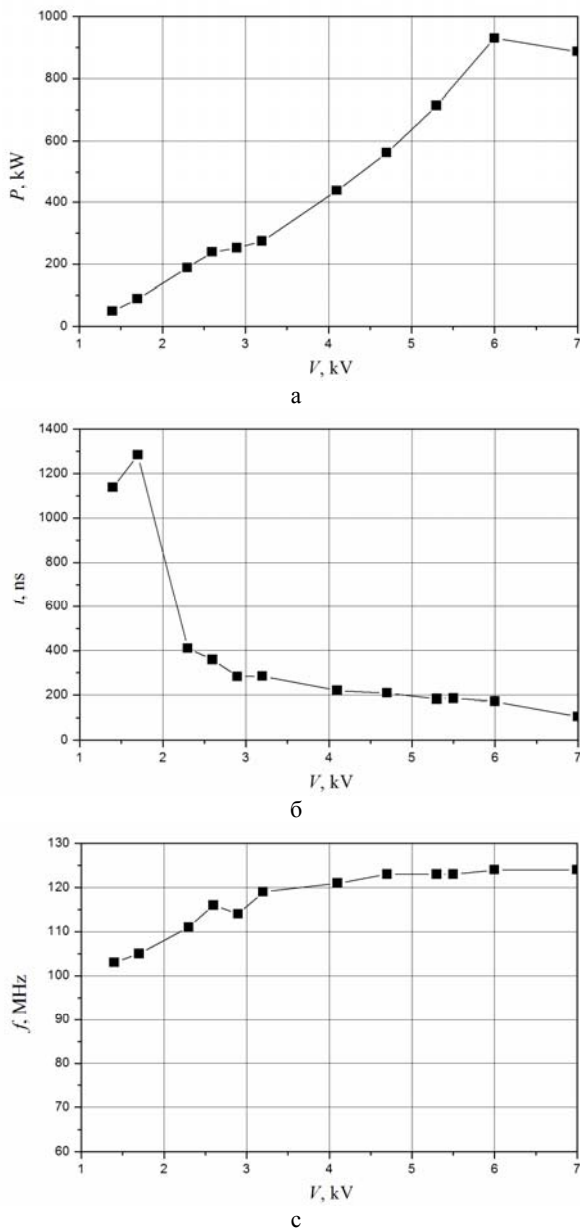


Рис. 4. Характеристики ВЧ-генератора на основе камеры с  $N_2$  (зависимости от напряжения самопробоя): а – действующая ВЧ-мощность на активной нагрузке; б – длительность генерации; с – частота генерации в зависимости при сопротивлении нагрузки величиной 3 Ом

Эту разницу между воздухом и  $N_2$  можно объяснить тем, что в состав воздуха входит  $O_2$ . Металл электродов, распыляемый электрической дугой, окисляется кислородом и покрывает электроды оксидами металлов. В азотной среде металлические капли, распыляемые электродами в дуге, взаимодействует с азотом меньше и оставшаяся металлическая пыль оседает на изоляторе. Исключить этот недостаток камеры с  $N_2$  может позволить защита изолятора с помощью диэлектрической ширмы. Тогда ресурс камеры будет определяться ресурсом источника  $N_2$ .

В итоге, в данной работе показано, что отпаянные газоразрядные камеры, снабженные источниками  $H_2$  и  $N_2$ , могут быть успешно применены в генераторах мощных ВЧ-импульсов с импульсно-периодическим режимом работы. Подобные генераторы представляются более эффективными и технологичными, они обладает меньшими энергозатратами, размерами и массой, чем аналогичные по параметрам вакуумные генераторы на основе электронных пучков.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 10-02-00137.

## Литература

1. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J., Rosenberg A., Slutsker Ya. Z. Phys. Rev. Lett. 71, 2919 (1993).
2. Arbel D., Bar-Lev Z., Felsteiner J., Rosenberg A., Slutsker Ya. Z. Appl. Phys. Lett. 66, 1193 (1995).
3. Bliokh Yu. P., Felsteiner J., Slutsker Ya. Z., Vaisberg P. M. IEEE Trans. Plasma Sci. 29, 895 (2001).
4. Bulychev S. V., Vyalykh D. V., Dubinov A. E., Zhdanov V. S., Kornilova I. Yu., L'vov I. L., Saikov S. K., Sadovoy S. A., Selemir V. D. Plasma Phys. Rep. 35, 941 (2009).
5. РФЯЦ-ВНИИЭФ, [www.vniief.ru](http://www.vniief.ru).
6. ООО «Импульсные технологии», [www.pulsetech.ru](http://www.pulsetech.ru).
7. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л. Н., Вагин Л. Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Сов. Радио, 1974.