

04;12

## Наблюдение нелинейной генерации высших гармоник ВЧ-колебаний в разряде с полым катодом

© Д.В. Вялых, А.Е. Дубинов, В.С. Жданов, И.Л. Львов,  
С.А. Садовой, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

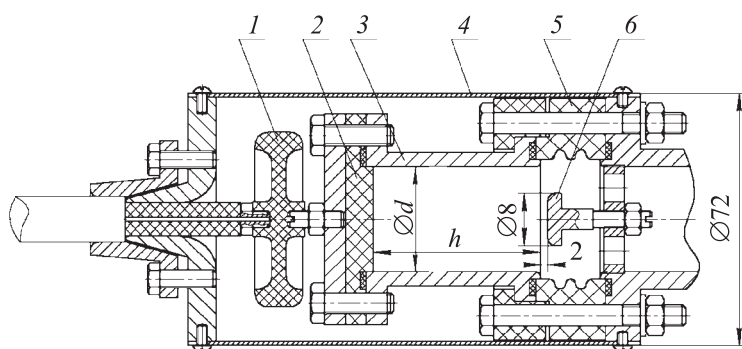
Поступило в Редакцию 4 октября 2012 г.

Исследованы две модификации мощных ВЧ-генераторов на основе разряда с полым катодом. Регистрировались спектры генерации при различных значениях длины катодной полости. Для обеих модификаций обнаружена генерация высших гармоник (2-я и 3-я гармоники). Появление высших гармоник обусловлено нелинейным волновым процессом в плазме разряда. Обнаруженное явление может быть использовано для двукратного увеличения несущей частоты в генераторах подобного типа.

В импульсных разрядах с полым катодом пониженного давления наблюдается генерация ВЧ-колебаний, которая может быть использована для создания мощных ВЧ-генераторов импульсного и импульсно-периодического действия. В работах [1–3] описаны созданные генераторы мегаваттного уровня мощности, несущие частоты генерации которых лежат в диапазоне 10–200 МГц. Подобные генераторы образуют новый класс приборов так называемой газоразрядной беспучковой СВЧ- и ВЧ-электроники [4]. Представляет особый интерес дальнейшее продвижение в область больших частот.

В указанных исследованиях было замечено, что с уменьшением диаметра цилиндрического полого катода частота генерации возрастает. В недавних работах [4,5] в результате использования новой геометрии сверхминиатюрного полого катода в виде металлической трубки с открытыми концами диаметром  $d = 15$  мм и длиной  $h = 15$  мм удалось достичь частоты генерации из СВЧ-диапазона — 450 МГц.

В данной работе исследовались особенности генерации в двух ВЧ-генераторах, в которых диаметры полых катодов  $d$  были 15 и 25 мм



**Рис. 1.** Схема газоразрядной камеры ВЧ-генератора: 1 — разделительный конденсатор; 2 — заглушка; 3 — полый катод; 4 — кожух; 5 — высоковольтный изолятор; 6 — анод; все размеры в мм.

(1-я и 2-я модификации соответственно), а длины катодных полостей  $h$  могли варьироваться.

Конструкция газоразрядной камеры ВЧ-генераторов, общая для обеих модификаций, показана на рис. 1. Основу камеры составляет полый катод, выполненный в виде цилиндрической трубки соответствующего диаметра. Возле одного из концов полого катода размещался анод диаметром 8 мм. Оба электрода были изготовлены из нержавеющей стали, и их рабочие поверхности были тщательно отполированы. Электроды были электрически отделены друг от друга высоковольтным изолятором. Другой конец полого катода закрывался диэлектрической заглушкой, частично заходящей в полость катода. Имелся набор заглушек различной толщины, что позволяло при смене одной заглушки другой варьировать глубину их захода в полость и рабочую длину полости  $h$ . Камера помещалась в экранирующий кожух.

Рабочий газ в камере — воздух при давлении 0.1 Торр. Схема подключения газоразрядной камеры была типична для ВЧ-генераторов подобного типа: катод и анод подключались через балластный резистор с сопротивлением 1 М $\Omega$  и неуправляемый разрядник с пробойным напряжением 2.5 кV к накопительному конденсатору емкостью 0.1  $\mu$ F.

Генератор работает следующим образом. Высоковольтный блок питания через балластный резистор заряжает накопительный конденсатор. Как только напряжение на конденсаторе превысит напряжения

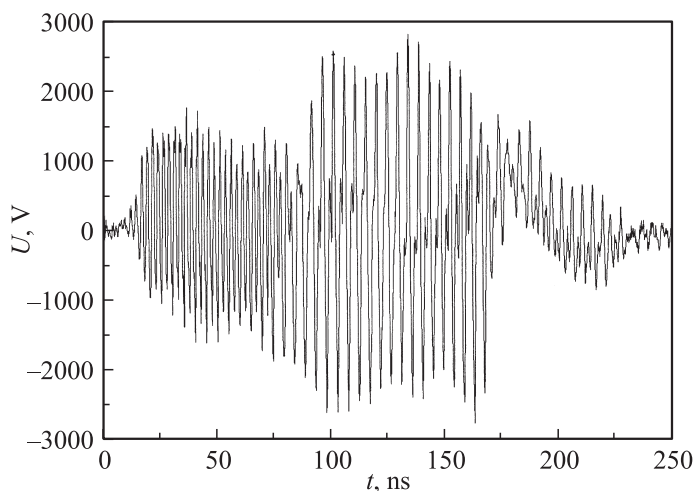
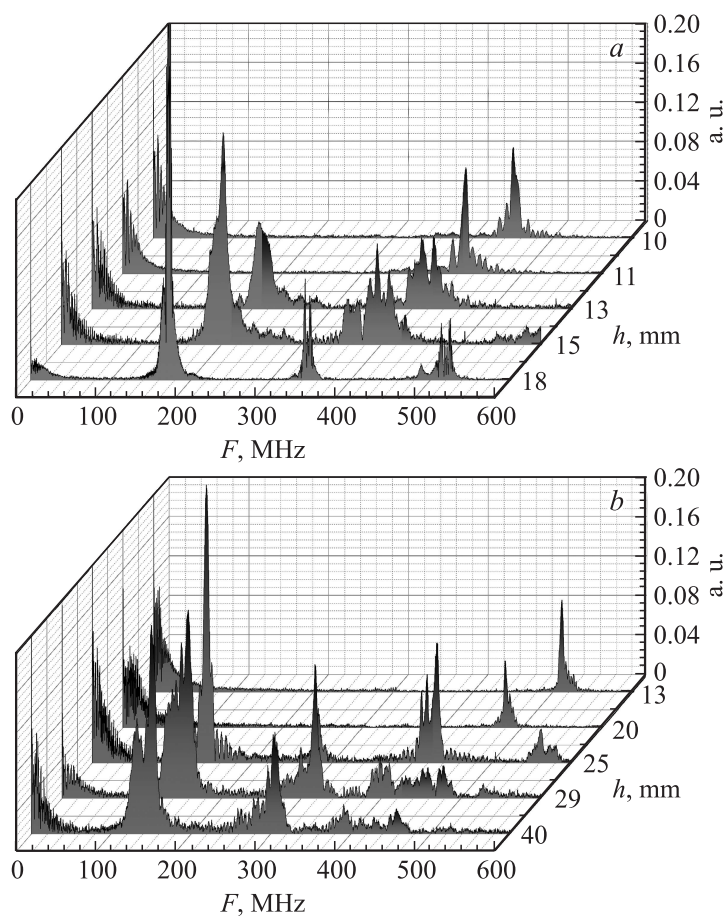


Рис. 2. Типичная осциллограмма выходного импульса ВЧ-генерации.

срабатывания неуправляемого разрядника, в камере генератора развивается объемный разряд. В результате неустойчивости плазмы разряда происходят ВЧ-осцилляции напряжения на электродах камеры. Сигнал с этими осцилляциями через разделительный конденсатор 3300 pF поступает в фидер с волновым сопротивлением 10  $\Omega$ .

Типичная выходная осциллограмма импульсов ВЧ-генерации при мегаваттном уровне мощности показана на рис. 2. Обращает на себя внимание то, что огибающая импульса „заполнена“ составляющими с двумя частотами, высокой и низкой, причем высокая частота заполняет, как правило, переднюю часть импульса практически полностью, а заднюю — лишь в небольшой доле интенсивности. Фурье-анализ импульсов позволил определить, что высокая частота представляет собой вторую гармонику низкой частоты, причем первая гармоника приходится на частоты  $\sim 200$  и  $\sim 150$  MHz для генераторов 1-й и 2-й модификации соответственно.

С помощью заглушек разной толщины была получена картина эволюции фурье-спектров ВЧ-колебаний при изменении  $h$ . Эти результаты для генераторов обеих модификаций представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Фурье-спектры ВЧ-колебаний в генераторе 1-й (*a*) и 2-й (*b*) модификаций при различных значениях длины катодной полости  $h$ .

Видно, что при максимально возможных длинах  $h$  (18 mm — для 1-й модификации и 40 mm — для 2-й) в спектрах присутствуют первая, вторая и третья гармоники, интенсивность колебаний на которых падает с номером гармоники, а также постоянная составляющая. Присутствие в

спектрах высших гармоник может быть объяснено двояко: или профиль ВЧ-колебаний сильно отличается от синусоиды по причине ангармоничности, которая может являться следствием, например, колебаний эффективного осциллятора в потенциальной яме, отличной по форме от параболической, или в плазме разряда с полым катодом происходят нелинейные волновые процессы с преобразованием энергии колебаний в высшие гармоники.

С уменьшением длины катодной полости  $h$  наблюдается изменение интенсивностей первой и второй гармоник. А при некоторых малых значениях  $h$  первая гармоника исчезает вообще. При этом значения частот первой и высших гармоник практически не изменяются для генераторов обеих модификаций. Эти факты свидетельствуют о том, что в разряде определяющим фактором является именно нелинейность, а не ангармоничность (для нее исчезновение первой гармоники не характерно).

В итоге, обнаруженные закономерности позволяют сформулировать следующий вывод: частоту генерации генератора на основе разряда с полым катодом можно двукратно повысить без заметного уменьшения мощности, если перевести разряд в режим генерации второй гармоники. Именно этим объясняется достижение в генераторах [4,5] частоты 450 МГц.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 10-02-00137а.

## Список литературы

- [1] Бульчев С.В., Вялых Д.В., Дубинов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 11. С. 1019.
- [2] Dubinov A.E., Kornilova I.Yu., Lvov I.L. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38. N 11. P. 3105.
- [3] Дубинов А.Е., Львов И.Л., Садовой С.А. и др. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 161.
- [4] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Жданов В.С. и др. // ДАН. 2012. Т. 442. № 4. С. 465.
- [5] Dubinov A.E., Lvov I.L., Sadovay S.A. et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2012. V. 40. N 8. P. 2079.