

## ГЕНЕРАЦИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЛИННОИМПУЛЬСНОМ ВИРКАТОРЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ПУЧКОМ

© А.Е.Дубинов, В.С.Жданов, И.В.Коновалов,  
И.В.Рожнов, В.Д.Селемир, К.В.Шибалко

1. Известно, что во взрывоэмиссионных сильноточных вакуумных диодах на динамику формирования электронного пучка большое влияние оказывает плазма расширяющихся катодного и анодного факелов [1]. Следовательно, движение этой плазмы должно сказываться и на механизмах генерации СВЧ излучения в виркаторах — СВЧ приборах с виртуальным катодом, в которых взрывоэмиссионный диод является основным элементом.

Физика работы виркаторов в режиме короткого импульса, когда время переключения диодного промежутка плазмой  $\tau_{пл}$  существенно больше длительности импульса высокого напряжения в диоде  $\tau_{имп}$  подробно рассмотрена в наших работах [2,3]. Однако с целью увеличения энергосодержания в генерируемом СВЧ импульсе путем увеличения его длительности представляет практический интерес рассмотреть особенности работы длинноимпульсных виркаторов, когда уже  $\tau_{пл}$  сравнимо с  $\tau_{имп}$ .

2. В короткоимпульсных виркаторах было обнаружено [4], что зависимость мощности генерации от величины зазора  $d$  катод-анодного промежутка имеет резкий максимум, однако каких-либо указаний об оптимальном значении  $d$ , соответствующем максимуму выходной мощности виркатора, в литературе не приводится.

В работах [2,3] было сделано предположение, что максимум по мощности соответствует режиму наилучшего согласования волнового сопротивления подводящей высоковольтной линии с импедансом диода.

Однако возможно и иное объяснение этого факта: максимум мощности соответствует такой величине диодного зазора  $d$ , когда частота колебаний электронов в потенциальной яме  $f$ , в первом приближении равная

$$2\pi f = T^{-1} = \beta c/4d, \quad (1)$$

где  $\eta$  — относительная скорость электронов в районе анодно сетки,  $c$  — скорость света в вакууме, равна одной из собственных частот резонатора, в котором формируется вирту-

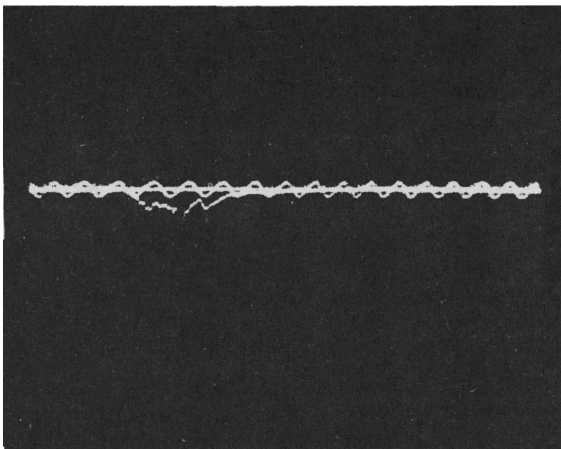


Рис. 1. Типичная осциллограмма огибающей СВЧ излучения в длинноимпульсном виркаторе (метки 40 МГц).

альный катод, или одной из резонансных частот волны пространственного заряда, распространяющейся поперек пучка. Тогда говорят, что в системе реализуется режим бирезонанса.

И в общем стратегия оптимизации по величине генерируемой мощности того или иного СВЧ генератора должна заключаться в вовлечении в колебания как можно большего числа степеней свободы так, чтобы собственные частоты колебаний этих степеней свободы совпадали (режим мультирезонанса).

Вместе с тем независимо от того, какова природа существования оптимальной величины диодного зазора  $d$ , в длинноимпульсных виркаторах это обстоятельство проявляется в том, что импульс СВЧ генерации имеет характерный максимум в момент прохождения мгновенного значения эффективного значения величины зазора (с учетом положения фронтов плазменных катодного и анодного факелов) через оптимальное значение (рис. 1). Подбирая значение величины  $d$  так, чтобы максимум мгновенного значения мощности СВЧ генерации на осциллограмме был синхронизован с максимумом мгновенного значения тока в диоде, можно добиться, чтобы пиковая мощность и импульсная энергия были бы максимальны. Если же  $d$  слишком велико, то максимум мощности СВЧ генерации может вообще возникнуть на заднем фронте импульса тока, как это наблюдалось в [5,6].

3. Для увеличения мощности генерации путем возбуждения поперечных направлению распространению электронного пучка волн пространственного заряда, бегущих по виртуальному катоду, в [7] было предложено использовать ленточный пучок электронов, а область формирования виртуального катода, согласно этому предположению, представляет собой поперечную замедляющую структуру. Фактически эта идея сводится к возможности бирезонанса электродинамических мод отрезка замедляющей структуры с волнами пространственного заряда, бегущими по виртуальному катоду.

В наших экспериментах, описанных ниже, предпринята попытка осуществления режима бирезонанса между продольными относительно направления распространения пучка колебаниями электронов в потенциальной яме "катод — виртуальный катод" и поперечными относительно пучка волнами пространственного заряда, бегущими вдоль виртуального катода. При этом область формирования виртуального катода представляла собой низкодобротный резонатор, что в противоположность [7] фактически исключало влияние собственных мод электродинамической структуры на режим бирезонанса.

4. Схема эксперимента с указанием необходимых размеров показана на рис. 2.

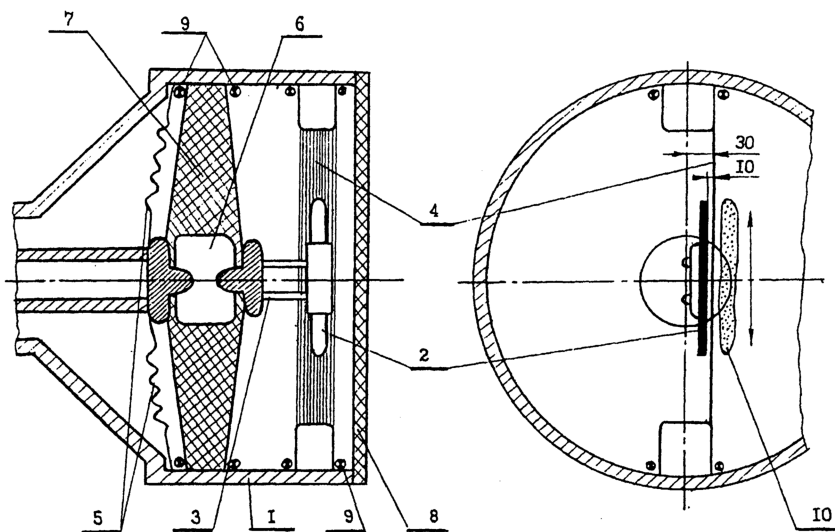
Катод викатора представлял собой графитовый прямоугольный элемент с эмиссионной поверхностью  $300 \times 20$  мм. В качестве анода использовалась сетка из танталовой проволоки  $\varnothing 0.3$  мм с геометрической прозрачностью 70%. Величина катод-анодного промежутка составляла 10 мм.

Источник питания обеспечивал импульс диодного тока 20 кА при напряжении 100 кВ в диоде. Длительность импульса тока в диоде составляла 200 нс по основанию при фронте длительностью 20 нс.

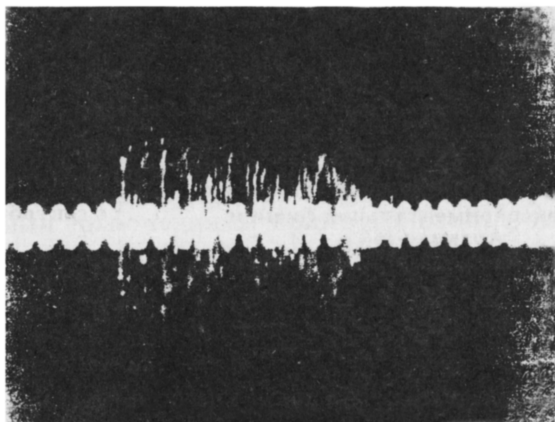
Время переключения диодного зазора приблизительно равно длине импульса тока, что соответствует средней суммарной скорости плазменных факелов  $\sim 5$  см/мкс.

Пиковая мощность СВЧ генерации была зарегистрирована на уровне 150 Мвт.

На рис. 3 приведена осциллограмма излучения в дальней зоне, зарегистрированная с помощью серийно выпускаемой широкополосной приемной антенны П6-23А, нагруженной на измерительный кабель. Из этой осциллограммы видно, что по мере продвижения плазменных факелов (или уменьшения ширины потенциальной ямы "катод — виртуальный катод") система последовательно входит в резонанс со все более высокочастотными волнами пространственного заряда, бегущими вдоль виртуального катода.



**Рис. 2.** Схема длинноимпульсного виркатера с ленточным пучком: 1 — корпус, 2 — катод, 3 — катододержатель, 4 — сетчатый анод, 5 — взрывающиеся проволочки, 6 — обостряющий разрядник, 7 — изолятор, 8 — окно вывода излучения, 9 — пояса Роговского, 10 — виртуальный катод (стрелками показано направление волн пространственного заряда, бегущих вдоль виртуального катода); все размеры указаны в мм.



**Рис. 3.** Осциллограмма СВЧ импульса, полученная с широкополосной антенны (метки 100 МГц). Видно возбуждение трех последовательных резонансов.

В пользу того, что возбуждаются именно волны пространственного заряда, а не собственные электромагнитные моды резонатора, говорят следующие обстоятельства:

— максимально низкая добротность резонатора на ТЕ модах;

— низкая спектральная плотность резонансных частот, так как собственные резонаторные моды расположены более плотно.

Были измерены резонансные частоты, последовательно возбуждающиеся в системе:  $f_1 = 1.7$  ГГц;  $f_2 = 3.2$  ГГц;  $f_3 \geq 4.2$  ГГц.

5. Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: по крайней мере в данных экспериментах, максимум зависимости мощности от величины зазора  $d$  соответствует режиму совпадения частоты колебаний электронов в потенциальной яме с собственной частотой внешней степени свободы, но не режиму согласования импедансов, так как по мере движения плазменных факелов диод не может иметь одновременно трех согласованных с высоковольтной подводящей линией импедансов, как на рис. 3.

#### Список литературы

- [1] Месляц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974.
- [2] Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sc. 1994. V. 22. N 5. P. 945.
- [3] Селемир В.Д., Алексин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7-8. С. 689.
- [4] Yatsuzuka M., Hashimoto Y., Sato M. et al. // J. Phys. Soc. Jap. 1991. V. 60. N 2. P. 352.
- [5] Азаркевич Е.И., Лиденко А.Н., Долгополов П.В. и др. // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 2. С. 352.
- [6] Азаркевич Е.И., Лиденко А.Н., Жерлицын А.Г. и др. Получение импульсов СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ (Препринт. Ин-т хим. физ. РАН) Черноголовка, 1992.
- [7] Ohkawa T. // US Patent № 4745336, 17.05.88, H 03 B 9/01.

Российский федеральный ядерный центр  
ВНИИ экспериментальной физики  
Арзамас-16

Поступило в Редакцию  
4 сентября 1995 г.