

## Генерация мягкого рентгеновского излучения в виркаторе со взрывающейся анодной фольгой

© А.Е. Дубинов, И.А. Ефимова, В.И. Каргин, Е.А. Ряслов, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: dubinov@rol.ru

(Поступило в Редакцию 11 октября 2006 г.)

Представлены результаты работ по созданию и исследованию генератора мягкого рентгеновского излучения на основе виркатора с плазменным анодом, формируемым при помощи электровзрыва анодной фольги. Проведены эксперименты по измерению мягкого ( $E_\gamma > 20$  eV) рентгеновского излучения для виркатора с металлическим и плазменным анодами. Зарегистрированы импульсы СВЧ-излучения, свидетельствующие о наличии в пучке виртуального катода.

PACS: 07.85.Fv, 29.27.Bd

Для генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения, когда энергия квантов лежит в диапазоне  $10^2$ – $10^4$  eV, в основном используются плазменные системы с разрядами типа Z-пинч, „плазменный фокус“ или схлопывающийся многопроволочный лайнер. Такие импульсы могут быть применены для исследований по физике термоядерной плазмы, радиационных исследований, рентгеновской литографии и др.

Однако в последнее время было показано, что мощные импульсы рентгеновского излучения можно получать и в пучковых системах: в отражательных триодах [1] и виркаторах [2] — электронных приборах с виртуальным катодом (ВК). Принцип действия таких приборов основан на том, что сильнооточный релятивистский электронный пучок с помощью ВК многократно пропускается сквозь оптически тонкую (в смысле рентгена) и прозрачную для электронов пучка анодную фольгу, выполняющую роль мишени тормозного излучения. При этом генерируется рентгеновское излучение, максимум интенсивности которого приходится на более мягкую область спектра, чем в генераторах тормозного излучения с толстыми мишенями и однократным пролетом электронов. Некоторые аспекты функционирования приборов с ВК в качестве генераторов рентгеновского излучения рассмотрены в обзорах [3,4].

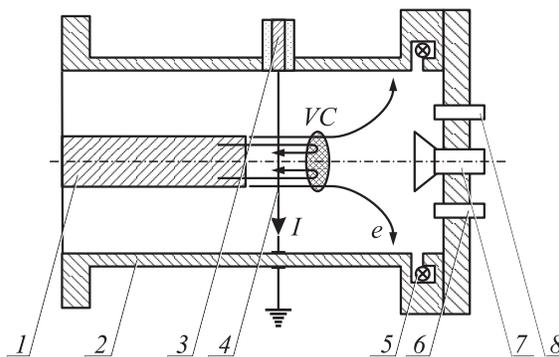
Как показали наши исследования виркаторов [2], источником рентгеновского излучения является процесс тормозного рассеяния электронов в плотной среде анодной фольги, и поэтому максимум в спектре приходится на диапазон квантов ( $10^3$ – $10^4$  eV), ограниченный снизу порогом прозрачности фольги.

В связи с этим представляет интерес дальнейшее продвижение в более мягкую часть спектра квантов. Для этого в [5] было предложено перед импульсом высокого напряжения в диоде виркатора предварительно электрически взрывать фольгу-мишень, пропуская по ней мощный импульс тока и переводя ее в состояние плотной плазмы. Предполагалось, что из такой плазменной мишени спектр генерации будет еще более смещен

в мягкую область и по форме приближен к тепловому, так как к процессам тормозного излучения пучковых электронов может добавиться излучение самой плотной плазмы, нагреваемой электронами пучка.

Для проверки этой идеи была создана специальная установка, схема вакуумной камеры которой показана на рис. 1. Внутри камеры высоковольтный стальной электрод диаметром 20 мм — катод — был подключен к генератору импульсного напряжения с амплитудой 80 кV. Анодом служила медная или алюминиевая фольга толщиной  $20 \mu\text{m}$ . Один конец фольги был подключен к обратному токопроводу, а другой — к конденсаторной батарее емкостью  $1.8 \cdot 10^{-3}$  F и зарядным напряжением от 1 до 5 кV.

Установка работала следующим образом. В начальный момент на анодную фольгу подавался импульс тока от конденсаторной батареи. Через  $70 \mu\text{s}$ , когда импульс тока в разрядном контуре достигал максимального значения 58 кA, происходил электрический взрыв фольги с иони-



**Рис. 1.** Схема виркатора с плазменным анодом для генерации мягкого рентгеновского излучения: 1 — катод; 2 — камера виркатора; 3 — токопровод; 4 — анодная фольга; 5 — пояс Роговского; 6 — детектор рентгеновского излучения ВРД; 7 — СВЧ-детектор; 8 — детектор рентгеновского излучения СПИД-11, закрытый медным фильтром; контактные датчики не показаны.

зацией продуктов испарения и образованием плазмы. В этот момент на катод подавался высоковольтный импульс и генерировался электронный пучок. В экспериментах межэлектродный зазор изменялся от 3 до 7 мм. При этом ток электронного пучка изменялся от 1.8 кА до 360 А.

При превышении током пучка значения предельного вакуумного тока в заанодной области дрейфа формировался ВК, заставляющий электроны пучка осциллировать в потенциальной яме „катод–анодная плазма–ВК“.

Осцилляции электронов в потенциальной яме и колебания ВК как целого, как известно, являются источником СВЧ-излучения. Регистрация такого СВЧ-излучения могла бы свидетельствовать о наличии в пучке ВК. Перед экспериментами было проведено компьютерное моделирование динамики электронного пучка к геометрии вакуумной камеры установки с помощью кода „КАРАТ“ [6] с целью определения центральной частоты СВЧ-излучения и правильного выбора СВЧ-датчиков. Было получено, что центральная частота СВЧ-излучения должна быть близка к 10 GHz.

В экспериментах использовались следующие измерительные системы. На расстоянии 140 мм от фольги располагались детекторы СВЧ- и рентгеновского излучения. Регистрация импульсов СВЧ-излучения проводилась с помощью маячкового диода 6Д13Д, размещенного в волноводе сечением  $23 \times 10$  мм. Один из детекторов рентгеновского излучения имел медный фильтр толщиной 100 мкм и регистрировал жесткое излучение ( $E_\gamma > 20$  keV), а другой, вакуумный рентгеновский диод (ВРД), — мягкое ( $E_\gamma > 20$  eV). Первый детектор служил для определения момента появления пучка электронов и его длительности, второй — для наблюдения за нагревом плазмы осциллирующими электронами. Для определения скорости разлета плазмы на расстоянии 20 мм от фольги и в месте расположения детекторов ВРД были установлены контактные датчики. Для ослабления потока излучения до уровня линейного режима работы ВРД на расстоянии 40 мм от фольги располагалась диафрагма с отверстием диаметром 3 мм. Ток пучка контролировался поясом Роговского.

В первых контрольных экспериментах измерялся выход мягкого рентгеновского излучения из плазмы, образовавшейся при электрическом взрыве фольги, когда высоковольтный импульс на катод не подавался.

Согласно предварительным оценкам, при зарядном напряжении 2 кВ конденсаторной батареи и толщине медной фольги 20 мкм электрический взрыв должен был произойти на 75-й мкс при токе 58 кА. Но из-за неоднородности фольги момент взрыва в каждом импульсе варьировался неконтролируемым образом на 3–5 мкс. Это подтверждалось различием моментов появления сигналов на контактном датчике, который замыкался при расширении анодной плазмы. До его замыкания сигнал на ВРД отсутствовал. Следовательно, излучение с энергией выше 20 eV практически отсутствовало.

Следующие контрольные эксперименты проводились с целью подтверждения образования ВК. В них элек-

трический взрыв фольги не осуществлялся. Наличие ВК подтверждалось регистрацией СВЧ-излучения.

В окончательных экспериментах измерялся выход мягкого рентгеновского излучения при нагреве плазмы электрического взрыва фольги осциллирующими электронами.

В экспериментах с плазменным анодом требовалось подать на катод импульс высокого напряжения в тот момент, когда плазма еще достаточно плотная. Смещение момента электровзрыва затрудняло выполнение этого условия, так как еще до подачи импульса могло произойти шунтирование ВРД. При электрическом взрыве в вакууме фольги малой длины (40 мм) паузы тока нет, и нет особенности на токе разряда батареи, которая служила бы временной отметкой момента электровзрыва. Поэтому для анализа результатов экспериментов использовались лишь те сигналы с ВРД, которые по времени опережали сигналы с контактного датчика. Затем из этих сигналов выбирались те, которые соответствовали более раннему моменту после электровзрыва фольги. Для этого проводилось сравнение моментов появления сигналов с ВРД и с контактного датчика (рис. 2 и 3). Рис. 2 соответствует более раннему моменту времени после электровзрыва фольги, а рис. 3 — на 750 нс более позднему, когда плотность плазмы уже снизилась. На нем сигнал с ВРД имеет меньшую амплитуду и длительное плато.

Результаты экспериментов с металлическим анодом (без электровзрыва) представлены на рис. 4, а с плазменным анодом — на рис. 5. При этом электровзрыв

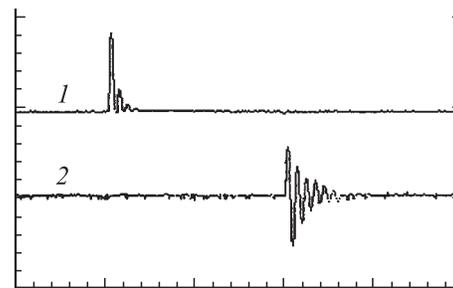


Рис. 2. Оциллограммы отработки виркатора в режиме раннего электровзрыва фольги: 1 — сигнал с ВРД, 2 — сигнал с контактного датчика, развертка — 500 нс/div.

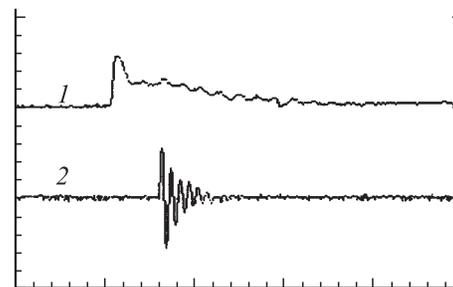
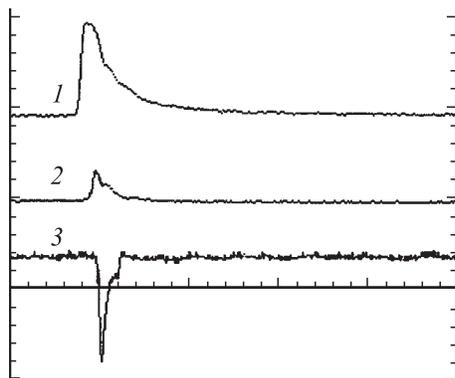
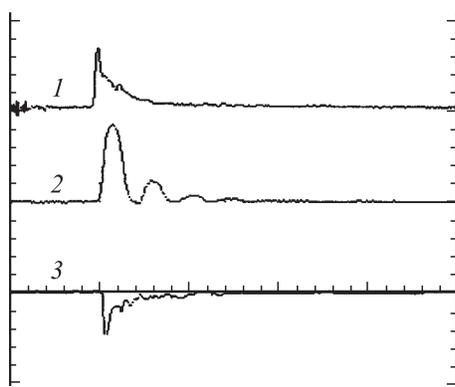


Рис. 3. Оциллограммы отработки виркатора в режиме позднего электровзрыва фольги, обозначения те же, что для рис. 2.



**Рис. 4.** Осциллограммы обработки триода в режиме металлического анода без электровзрыва фольги: 1 — сигнал с СППД-11, 2 — с ВРД, 3 — с СВЧ-детектора, развертка — 500 ns/div.



**Рис. 5.** Осциллограммы исследования триода в режиме электровзрыва фольги обозначения те же, что для рис. 4.

фольги произошел за 150 ns до подачи импульса питания на катод. В экспериментах с плазменным анодом интенсивность мягкого рентгеновского излучения в три раза выше, чем в случае отсутствия электровзрыва, что подтверждает нагрев плазмы осциллирующими электронами. Вместе с тем наблюдается некоторое уменьшение амплитуды СВЧ-импульса.

Таким образом, в данной работе впервые реализован и исследован триод с электрически взрывающейся фольгой для генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения в соответствии с патентом [5].

## Список литературы

- [1] Завада Н.И., Трошкин И.А., Зеленский К.Ф. и др. // Вопросы атомн. науки и техн. Сер. Физ. радиац. возд. на радиофиз. аппаратуру. 1994. № 3–4. С. 23.
- [2] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Каргин В.И. и др. // Вопросы атомн. науки и техн. Сер. Плазмен. электроника и нов. мет. ускорения. 2003. № 4. С. 15.
- [3] Ware K.D., Gullickson R.L., Pierre J.M. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28. N 5. P. 1397.

- [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.
- [5] Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Макарова Н.Н. Способ генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения. Патент РФ № 2128411. МКИ: Н 05 G 2/00. Н 01 J 35/08. 1999. БИ № 9.
- [6] Котетешвили П.В., Рыбак П.В., Тараканов В.П. KARAT — средство вычислительного эксперимента в электродинамике. Препринт № 44. М.: ИОФ АН СССР, 1991. 46 с.