

04;12;10

## **Плазменный размыкатель с сегнетоэлектрическим плазменным инжектором**

© А.Е. Дубинов, В.И. Каргин, А.С. Немчинов, Е.А. Ряслов,  
С.А. Садовой, В.Д. Селемир

ФГУП Российский федеральный ядерный центр —  
ВНИИ экспериментальной физики  
E-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

Поступило в Редакцию 5 июля 2004 г.

Разработан и исследован генератор с плазменным размыкателем тока и с сегнетоэлектрическим плазменным инжектором. Опробовано два режима генератора: с нагрузкой в виде электронного диода для генерации тормозного рентгеновского излучения и с нагрузкой в виде виркатора для генерации СВЧ-излучения.

Для получения мощных наносекундных импульсов высокого напряжения или тока получили развитие генераторы на основе индуктивных накопителей (ИН) с плазменными размыкателями тока (ПРТ) [1]. Как правило, такие генераторы содержат потенциальные протяженные электроды, образующие вакуумный межэлектродный промежуток. С одного конца электроды подключены к источнику тока, а с другого к ним подключается нагрузка (вакуумный или плазменный диод и т.п.). На одном из электродов между источником тока и нагрузкой устанавливаются один или несколько плазменных инжекторов.

Работа генераторов с ПРТ происходит следующим образом. Сначала запускаются плазменные инжекторы, которые инжектируют плазменные струи в вакуумный межэлектродный промежуток. Как только струи достигают противоположного электрода, в генераторе создается ток-контур „источник тока — электрод, содержащий плазменные инжекторы, — плазменные струи — противоположный электрод“, являющийся ИН. С этого момента запускается источник тока, обеспечивающего накопление магнитной энергии в ИН.

После того как накопленная энергия в ИН достигнет максимума, сопротивление плазмы по той или иной причине резко возрастает, что приводит к передаче накопленной энергии из ИН в нагрузку.

Обычно в качестве плазменных инжекторов используются устройства на основе вакуумных разрядов вдоль поверхности изолятора. Так, например, в [2] описаны плазменные инжекторы, которые были выполнены из отрезка коаксиального кабеля. В них плазма создавалась посредством поверхностного разряда вдоль изоляции на торце кабеля между его проводниками. Изолятор кабеля был выполнен из органического полимера и покрывался перед каждым импульсом слоем спиртовой суспензии графита. Разряд в таких инжекторах осуществлялся при подаче на их электроды импульса напряжения 25 kV.

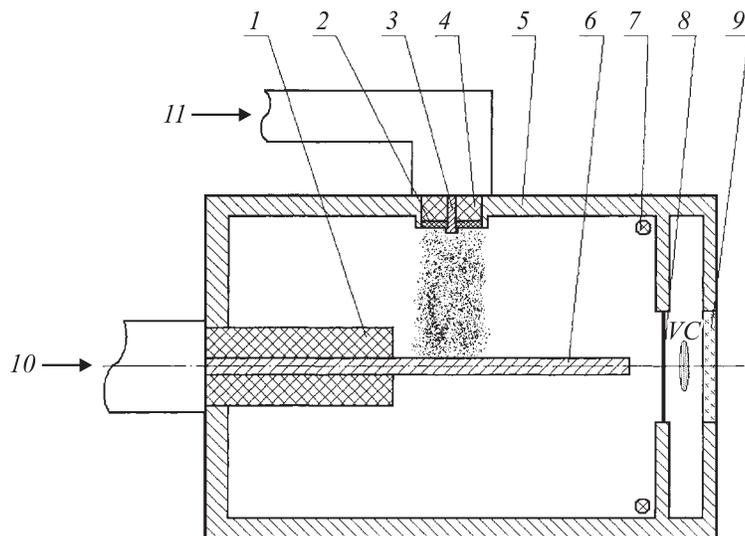
Другая конструкция инжекторов описана в [3]: на тонкую диэлектрическую пленку (каптон — kapton DuPont Corporation) наносился проводящий слой меди в виде рисунка, определяющего систему тонких электродов. При подаче на них импульса напряжения 23–30 kV по поверхности диэлектрика, свободной от медного покрытия, развивался поверхностный разряд, который и был источником плазмы в ПРТ.

Таким образом, для создания плазмы в описанных плазменных инжекторах необходимы дополнительные источники питания, вырабатывающие импульсы высокого напряжения. Цель данной работы — создание генератора на основе ПРТ с более низкими энергетическими затратами на создание плазмы.

Техническое решение, позволяющее снизить энергетические затраты на создание поверхностной плазмы, заключается в выборе специального материала изолятора. Для этого материал изолятора должен обладать как можно большим значением диэлектрической постоянной  $\epsilon$ . Известно, что сегнетоэлектрики могут иметь  $\epsilon > 1000$ . В соответствии с этим в [4] был предложен ПРТ с сегнетоэлектрическими плазменными инжекторами.

В качестве подготовительного этапа при создании ПРТ с сегнетоэлектрическими плазменными инжекторами была проведена серия исследований по определению зависимости порогового напряжения  $U_{thr}$  формирования поверхностного разряда в вакууме от диэлектрической постоянной  $\epsilon$  материала изолятора. Была получена монотонно спадающая зависимость  $U_{thr}(\epsilon)$  [5].

Конструктивная схема генератора с ПРТ представлена на рис. 1. Генератор включает в себя импульсный источник питания ИН БИНГ-6,



**Рис. 1.** Генератор с ПРТ, с сегнетоэлектрическим плазменным инжектором и с виркаторм в качестве нагрузки: 1 — изолятор ИН, 2 — сегнетоэлектрическая таблетка, 3 — высоковольтный электрод плазменного инжектора, 4 — изолятор инжектора, 5 — внешний электрод ИН — анод, 6 — внутренний электрод ИН — катод, 7 — пояс Роговского, 8 — анодная фольга или сетка, 9 — окно вывода СВЧ-излучения, VC — виртуальный катод, 10 — источник питания индуктивного накопителя БИНГ-6, 11 — источник питания инжектора БИНГ-5.

коаксиальную систему протяженных электродов, образующих ИН, плазменный инжектор с сегнетоэлектрическим изолятором, установленный на внешнем протяженном электроде, и импульсный источник питания плазменного инжектора БИНГ-5. В объеме ИН поддерживался вакуум глубиной до  $10^{-5}$  Торг. Нагрузкой генератора с ПРТ служили вакуумный электронный диод в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения либо СВЧ-генератор типа виркатор.

Диаметр внутреннего протяженного электрода ИН составлял 3 мм, внешнего — 120 мм, длина ИН составляла 150 мм.

Источник питания БИНГ-6 может формировать наносекундные импульсы амплитудой — 75 кВ, его емкость в „ударе“ —  $6.6 \cdot 10^{-9}$  Ф, а источник БИНГ-5 — амплитудой 10 кВ и его емкость в „ударе“ —

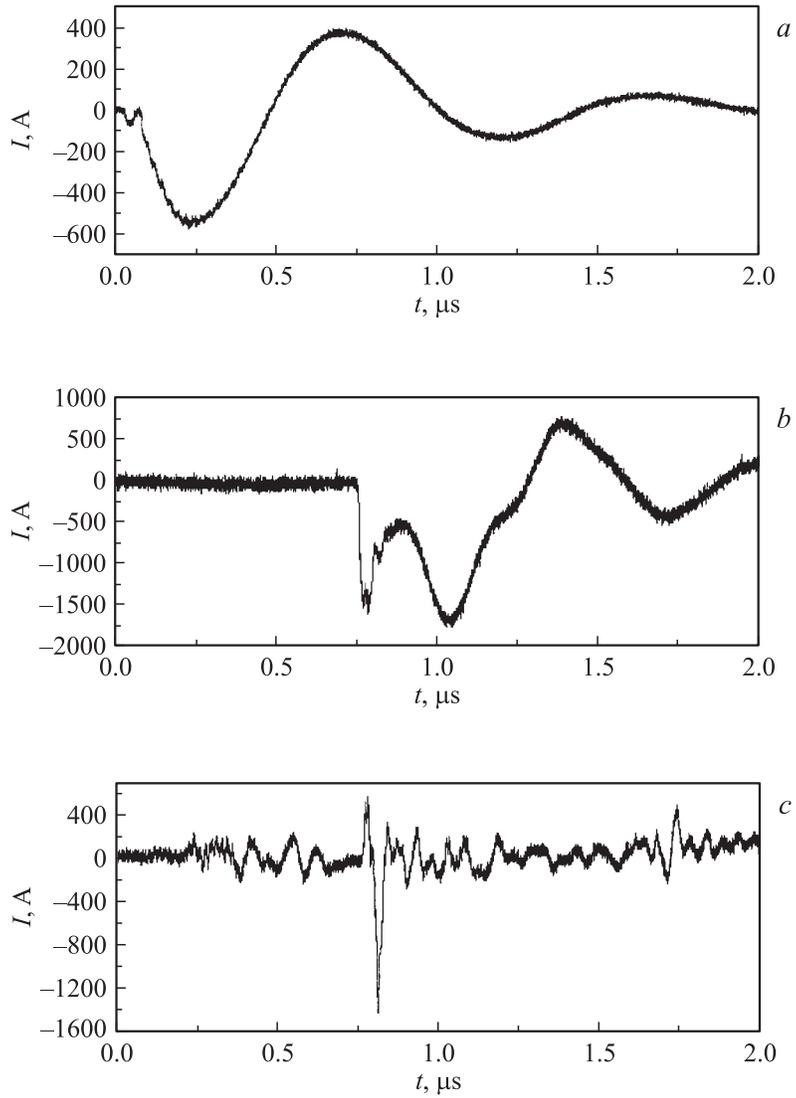
$4.5 \cdot 10^{-9}$  Ф. Другие параметры источников импульсного напряжения семейства БИНГ, разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ, представлены в [6]. Подсоединение указанных источников осуществлялось с помощью коаксиальных кабелей.

Плазменный инжектор коаксиального типа был изготовлен на основе плазмообразующего изолятора в виде таблетки сегнетокерамики ЦТС-19, имеющей  $\epsilon = 1300$ . Диаметр таблетки — 15 mm, толщина — 2 mm. В центре таблетки высверливалось отверстие диаметром 2 mm, в которое вставлялся центральный электрод инжектора. Вдоль одной из плоскостей таблетки возникал радиальный поверхностный разряд между коаксиальными электродами, радиальный размер межэлектродного промежутка составлял 5 mm. Плазма разряда инжектировалась в межэлектродный промежуток ИН в виде струи, концентрация электронов в которой по данным зондовых измерений по методике [7] составляла в момент замыкания ИН несколько единиц  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  при 10 kV. Отметим, что при таком же напряжении и аналогичной геометрии инжектора на диэлектрике из полиэтилена поверхностный разряд не возникал вообще.

Запуск заряда ИН осуществлялся с задержкой относительно запуска плазменных инжекторов. Оптимальная величина задержки оказалась равной  $0.75 \mu\text{s}$ .

В экспериментах с генератором использовались следующие методики измерений. Для измерения тока в ИН и тока разряда плазменного инжектора использовались шунты. Ток в нагрузке измерялся поясом Роговского. Импульсы тормозного рентгеновского излучения регистрировались с помощью полупроводниковых детекторов типа СППД-11-03. Регистрация огибающей импульсов СВЧ-излучения проводилась с помощью маячкового диода 6Д13Д, размещенного в волноводе сечением  $72 \times 34$  mm. Напряжение на нагрузке измерялось с помощью высоковольтного делителя.

Приведем результаты регистрации работы генератора с ПРТ. На рис. 2, *a–e* представлены синхронизированные осциллограммы, демонстрирующие его работу. На рис. 2, *a* показана осциллограмма разрядного тока плазменного инжектора, а на рис. 2, *b* — осциллограмма тока в ИН. Видно, что ток в ИН задержан относительно разрядного тока в инжекторе на  $0.75 \mu\text{s}$  и что после всплеска тока в ИН возникает его спад, вызванный резким возрастанием сопротивления плазмы. В этот момент происходит размыкание в ПРТ и переключение тока в нагрузку. Осциллограмма тока в нагрузке показана на рис. 2, *c*. При величине



**Рис. 2.** Типичные осциллограммы при работе генератора с ПРТ: *a* — ток разряда в плазменном инжекторе, *b* — ток в ИН, *c* — ток в нагрузке, *d* — рентгеновский импульс, *e* — СВЧ-излучение.

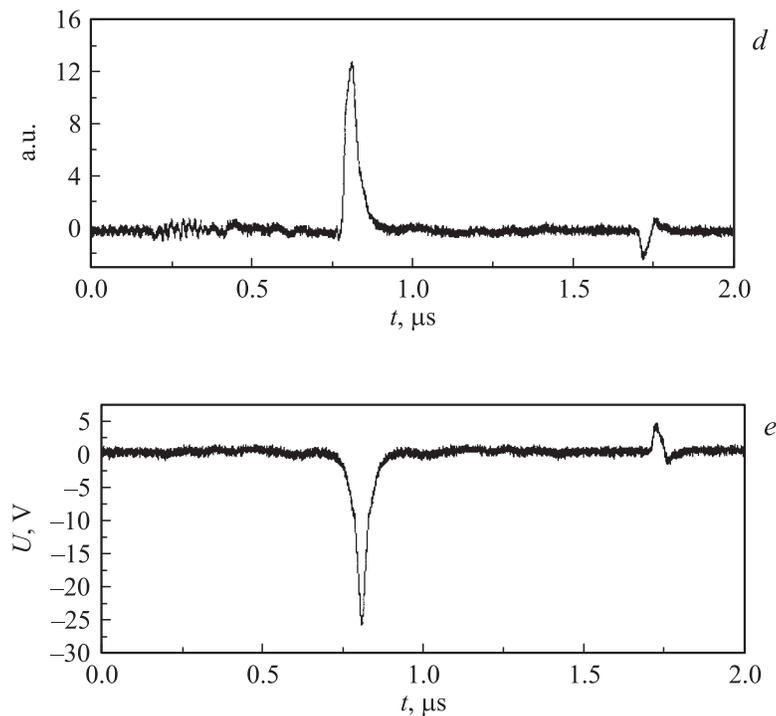


Рис. 2 (продолжение).

напряжения зарядка формирующей линии 75 kV, максимальное значение напряжения сформированного импульса составило 160 kV.

Для того чтобы в качестве нагрузки генератора с ПРТ был вакуумный электронный диод в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения, в анод встраивалась мишень из танталовой фольги толщиной 20  $\mu\text{m}$ . Для длины диода 5 mm осциллограмма импульса тормозного рентгеновского излучения показана на рис. 2, d.

Для того чтобы в качестве нагрузки генератора с ПРТ был СВЧ-генератор типа виркатор, мишень заменялась анодной сеткой из танталовой проволоки диаметром 0.15 mm, а за ней размещался промежуток дрейфа электронного пучка длиной 10 mm, на конце которого располагалось диэлектрическое окно вывода СВЧ-излучения. Этот вариант нагрузки показан на рис. 1. Зарегистрированный импульс

СВЧ-излучения показан на рис. 2,е, его мощность оценивается в несколько десятых долей MW.

Таким образом, в работе разработан и исследован с разными нагрузками генератор с ПРТ и с сегнетоэлектрическим плазменным инжектором.

## Список литературы

- [1] *Meger R.A., Commisso R.J., Cooperstein G., Goldstein S.A.* // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 42. N 11. P. 943.
- [2] *Mendel C.W., Zagar D.M., Millis G.S.* et al. // Rev. Sci. Instrum. 1980. V. 51. N 12. P. 1641.
- [3] *Renk T.J.* // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 7. P. 2652.
- [4] *Дубинов А.Е., Макарова Н.Н., Садовой С.А.* и др. Плазменный прерыватель тока. Патент РФ № 2165684, приоритет от 27.04.1999. (Опубл. в БИ, 2001, № 11).
- [5] *Булычев С.В., Дубинов А.Е., Жданов В.С.* и др. Исследования по физике газового разряда. Сб. науч. тр. / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 182.
- [6] *Kudasov V.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A.* et al. // Proc. 11<sup>th</sup> International Pulsed Power Conf. Baltimore, Maryland, USA. 1997. P. 1572.
- [7] *Дубинов А.Е., Львов И.Л., Садовой С.А., Селемир В.Д.* Исследования по физике газового разряда. Сб. науч. тр. / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 71.