

02;09;10;12

Отражательный триод с виртуальным катодом и с эмиттером на основе магнитоприжатого разряда

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

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

Поступило в Редакцию 20 января 2005 г.

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования отражательного триода с виртуальным катодом нового типа, в котором в качестве источника электронов используется поверхностный разряд вдоль сегнетоэлектрика, а в качестве устройства вывода излучения — петлевые антенны. Электродная система отражательного триода разработана таким образом, чтобы силы магнитного давления разряда вдоль поверхности диэлектрика прижимали приповерхностную плазму к поверхности диэлектрика. Эта система позволила увеличить длительность генерации в ~ 20 раз по сравнению с предыдущими разработками. Получена генерация широкополосных радиоимпульсов в диапазоне частоты $20 \div 230$ MHz и мощностью около 140 W.

Генераторы электромагнитного излучения с виртуальным катодом — виркаторы и отражательные триоды — представляют собой широкий класс мощных релятивистских триодных СВЧ-генераторов, которые благодаря своим уникальным качествам находят все большее развитие [1–4]. Их принцип действия основан на инжекции в эквипотенциальную полость (в случае виркатора) или в полость с тормозящим электрическим полем (в случае отражательного триода) электронного пучка с такой силой тока, чтобы в полости возник виртуальный катод. Его колебания являются источником электромагнитного излучения, которое выводится из полости с помощью антенной системы.

Начиная с работы [5], в этом классе приборов наметилась новая возможность — создание ВЧ-генераторов с виртуальным катодом с умеренной мощностью и со сравнительно более низким напряжением ускорения, составляющим несколько единиц или несколько десятков

киловольт. Такие генераторы позволят заполнить существующий пробел между обычными триодными лампами с напряжением в диоде до нескольких киловольт, использующими термоэлектронную эмиссию, и релятивистскими отражательными триодами с напряжением от 100 кV и выше, использующим взрывную эмиссию электронов.

Это стало возможным благодаря использованию особых эмиттеров электронов, работа которых основана на вытягивании электронов из скользящего по поверхности диэлектрика завершенного вакуумного разряда. Для уменьшения напряжения зажигания скользящего разряда в [5] также было предложено использовать диэлектрики с большим ϵ — сегнетоэлектрики. В соответствии с этим ранее нами был разработан и испытан отражательный триод с виртуальным катодом и получено, что при ускоряющем напряжении всего 1 кV на нагрузке в виде петлевых антенн выделяется излучение мощностью 80 W на частоте 320 МГц¹. При этом длительность генерируемого радиоимпульса не превышает 100 ns. Столь короткая длительность объясняется тем, что магнитное давление разрядного тока выбрасывает плазму скользящего разряда на анодную сетку, что приводит к шунтированию плазмой катод-анодного промежутка отражательного триода и прекращению генерирования электронного пучка.

Для увеличения длительности генерации целесообразно использование источников электронов на основе незавершенного скользящего разряда либо из магнитопритянутого разряда согласно изобретению [7].

В соответствии с этим техническим решением был разработан, создан и испытан новый отражательный триод, конструкция которого показана на рис. 1. Он содержит источник управляющего напряжения, источник ускоряющего напряжения, устройство вывода электромагнитного излучения — петлевые антенны и вакуумную камеру, внутри которой последовательно размещены коллектор, прозрачный для электронов анод (представляющий собой сетку из танталовой проволоки диаметром 0.1 mm, геометрическая прозрачность сетки — 95%), подключенный к источнику ускоряющего напряжения, плазмообразующий диэлектрический элемент скользящего разряда, выполненный из сегнетокерамики марки ЦТС-19 и охватывающий его заземленный электрод, а также управляющий электрод, одним концом подключенный

¹ Отметим, что в работе [6] был реализован и исследован СВЧ-генератор другого класса — гиротрон — с сегнетоэлектрическим эмиттером, на котором при ускоряющем напряжении в 9 кV была получена генерация мощностью 25 W.

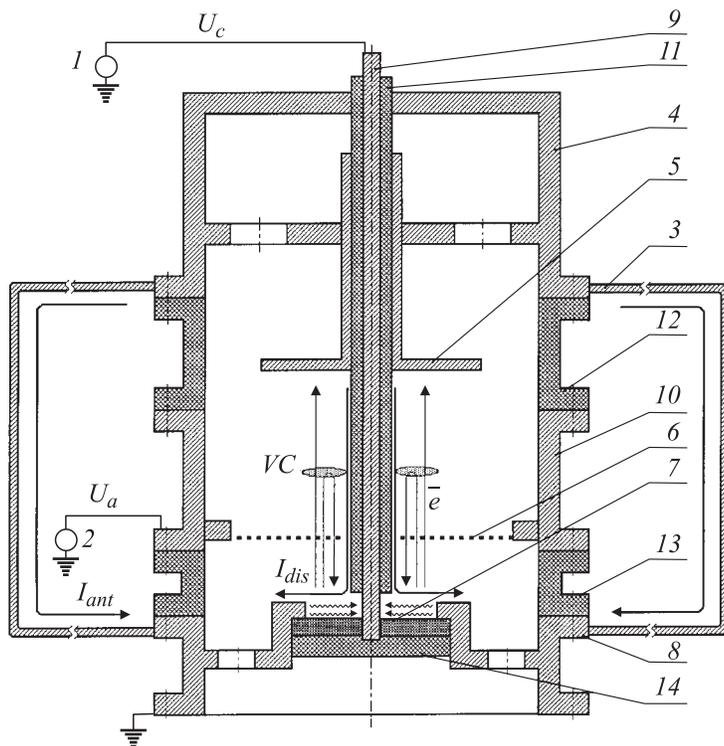


Рис. 1. Схема отражательного триода: 1 — источник управляющего напряжения, 2 — источник ускоряющего напряжения, 3 — устройство вывода электромагнитного излучения — петлевые антенны, 4 — вакуумная камера, 5 — коллектор, 6 — анод (сетка), 7 — диэлектрический плазмообразующий элемент, имеющий отверстие, 8 — заземленный электрод, 9 — управляющий электрод, 10 — анодный фланец, 11 — изолятор, 12, 13 — диэлектрические изолирующие фланцы, 14 — изолирующая шайба.

к источнику управляющего напряжения, а другим установленный в отверстие диэлектрического элемента. При этом управляющий электрод и заземленный электрод образуют зазор у поверхности плазмообразующего диэлектрика со стороны расположения анода. Конец управляющего электрода, свободный от подключения, установлен в

отверстие диэлектрического элемента со стороны расположения анода, а другой конец подключен к источнику управляющего напряжения с той же стороны. В данной конструкции анод представляет собой металлическую сетку, а диэлектрический элемент имеет форму диска с отверстием посередине. Положение анода и коллектора относительно поверхности диэлектрика можно регулировать в диапазоне 1.5 mm.

Антенная система представляла собой четыре параллельно включенные проволочные петли из медного провода диаметром 3 mm. Форма петель — прямоугольник, который имеет периметр, примерно равный четверти длины волны генерируемого излучения. Петли располагаются равномерно по азимуту относительно оси триода.

Принцип работы нового отражательного триода заключается в следующем. Импульс высокого напряжения положительной полярности подается на управляющий электрод инициирует скользящий разряд в зазоре между ним и кромками заземленного электрода у поверхности диэлектрического элемента. На анод подается статическое высокое напряжение положительной полярности через подключение источника ускоряющего напряжения к анодному фланцу и путем электрического контакта анодного фланца и анода. С помощью анодного напряжения из плазмы скользящего разряда вытягиваются электроны, которые, пролетая сквозь анод, образуют виртуальный катод. Ток частиц, пролетевших сквозь виртуальный катод к коллектору, через проводящие элементы вакуумной камеры выводится на петлевые антенны, включенные между вакуумной камерой и заземленным электродом, в результате чего антенны будут излучать в пространство электромагнитные волны на частоте ВЧ-диапазона.

Жирными стрелками на рис. 1 показано направление протекающих токов, тонкими волнистыми стрелками показано направление движения электронов в разрядной плазме, а тонкими прямыми стрелками — направление движения электронов вытягиваемого пучка.

В новой конструкции токовый контур скользящего разряда имеет такую форму, что возникающая в нем сила Ампера не отталкивает, а наоборот, прижимает плазму разряда к поверхности плазмообразующего диэлектрика.

Таким образом, межэлектродный зазор расположен с внутренней стороны токового контура и магнитная сила Ампера действует на плазму разряда в направлении к поверхности диэлектрика, препятствуя движению плазмы по направлению к аноду. Так как плазма при этом

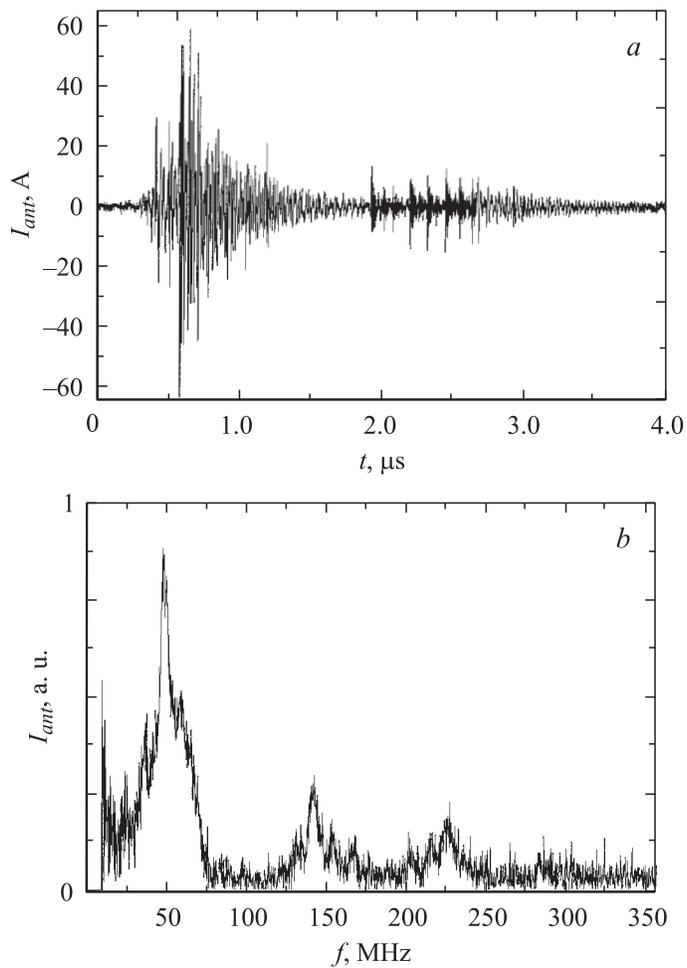


Рис. 2. Характеристики излучения отражательного триода: *a* — осциллограмма импульса излучения, *b* — спектр излучения.

остается на месте, то расстояние между ней и анодом, а также виртуальным катодом остается неизменным, а значит, геометрические параметры потенциальной ямы, в которой колеблются отраженные электроны,

не изменяются и частота колебаний также остается неизменной. Это способствует стабилизации частоты генерации отражательного триода, которая равняется частоте колебаний электронов в потенциальной яме.

Также вследствие того что расстояние между плазмой разряда и анодом не уменьшается, перемикания промежутка между ними не происходит и потенциал анода не изменяется. Поэтому сообщаемая вытягивающимся из плазмы электронам энергия не уменьшается и прекращения формирования пучка не происходит. Следовательно, по сравнению с [5] существенно увеличивается длительность пучка, а значит увеличиваются и длительность генерируемого излучения, и его энергия.

При испытаниях отражательного триода было получено, что при его питании 1 kV, зазоре между эмиттером и анодной сеткой 5 mm, площади эмитирующей плазмы скользящего разряда 30 mm² он может генерировать ВЧ-импульсы мощностью 140 W с частотой следования 50 Hz и более на частоте излучения в диапазоне 50–230 MHz. Типичная осциллограмма импульса суммарного тока в петлевых антеннах представлена на рис. 2, *a*, а типичный спектр излучения — на рис. 2, *b*. Таким образом, следуя [7], удалось увеличить длительность импульса в ~ 20 раз и энергию в импульсе излучения в ~ 30 раз.

В заключение сформулируем перспективы дальнейшего использования разработанного отражательного триода. Они состоят в том, что:

при увеличении величины диодного напряжения в α раз мощность должна возрастать в $\alpha^{5/2}$ раз в соответствии с известным „законом трех вторых“. Это обстоятельство обосновывает возможности такого прибора заполнить указанный выше пробел в ряду отражательных триодов;

хотя разработанный триод создавался в виде макета только для проверки идей изобретения [7], в дальнейшем планируется его использование в работах по исследованию прохождения ВЧ-импульсов через газоразрядную плазму.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Арзин А.П., Жерлицын А.Г. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. № 4. С. 104.
- [2] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.

- [3] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.
- [5] Булычев С.В., Дубинов А.Е., Жданов В.С. и др. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 7. С. 639.
- [6] Drori R., Einat M., Shur D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 3. P. 335.
- [7] Булычев С.В., Дубинов А.Е., Львов И.Л. и др. Отражательный триод. Патент РФ № 2214648. Н 01 J 25/68. Приоритет от 19.03.2001. // БИ. 2003. № 29.