

02;09;10;12

## **Виркатор дециметрового диапазона с предмодуляцией электронного пучка на основе компактного генератора с индуктивным накопителем энергии**

© А.М. Ефремов, А.А. Жерлицын, С.А. Кицанов, А.И. Климов,  
С.Д. Коровин, Б.М. Ковальчук, И.К. Куркан, О.П. Кутенков,  
С.В. Логинов, И.В. Пегель, С.Д. Полевин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: polevin@lfe,hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 20 октября 2000 г.

В дециметровом диапазоне длин волн экспериментально реализован виркатор с предмодуляцией электронного пучка на основе компактного генератора с индуктивным накопителем энергии. Мощность излучения составляла 300 MW при КПД около 5% и длительности импульса 50 ns. Частота генерации не изменялась в течение импульса и задавалась параметрами электродинамической системы.

Идея совмещения электродинамической обратной связи с виртуальным катодом предлагалась еще в 70-е гг. [1]. Дальнейшие исследования [2,3] показали, что использование обратной связи и предмодуляции электронного пучка в виркаторе позволяет ему эффективно работать при 20–30% надкритичности тока. В этом случае, в отличие от обычных виркаторов, работающих при 2–3-кратном превышении критического тока, можно обеспечить более высокую эффективность генерации, одно-модовый режим, стабильность частоты излучения и возможность управления частотой путем изменения параметров резонатора. Трехмерное компьютерное моделирование, выполненное с помощью полного электромагнитного PIC — кода KARAT, продемонстрировало возможность реализации дециметрового виркатора с предмодуляцией электронного пучка с эффективностью генерации более 10% и перестройкой частоты по половинному уровню мощности в полосе до 20% [3]. В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований виркатора с предмодуляцией электронного пучка, разработанного в рамках

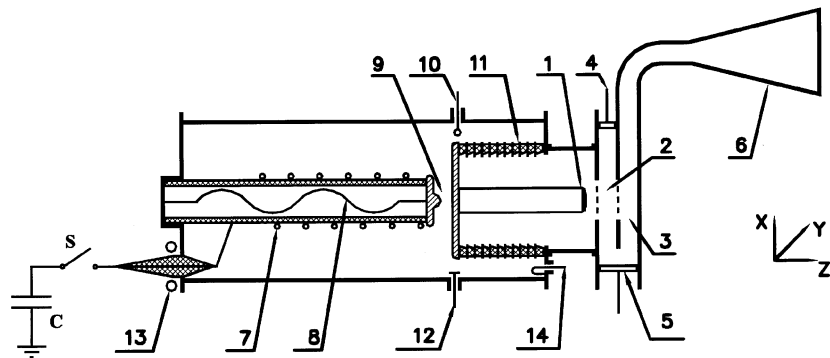


Рис. 1. Схема установки.

этой концепции. С другой стороны, значительная часть экспериментов по исследованию виркаторов [4] проводилась с использованием сравнительно громоздких дорогостоящих ускорителей на основе генераторов Маркса. Целью данных исследований была экспериментальная реализация виркатора дециметрового диапазона на основе компактного генератора с индуктивным накопителем энергии.

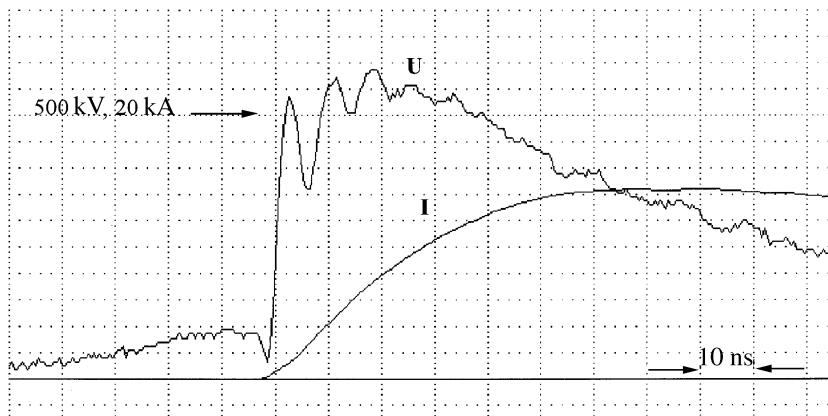
Схема виркатора с предмодуляцией электронного пучка представлена на рис. 1. Электронный пучок формировался в планарном вакуумном диоде 1 без внешнего фокусирующего магнитного поля и затем транспортировался через модулирующую секцию 2 и секцию энергоотбора 3, которые имели окна из вольфрамовых сеток с геометрической прозрачностью около 0.95. Секции представляли собой отрезки прямоугольных волноводов и были электродинамически связаны прямоугольным отверстием связи. Изменением положения и размера отверстия связи, а также положения плунжера 4 осуществлялась настройка электродинамической системы виркатора на оптимальный режим и требуемую частоту генерации. По результатам численного моделирования оптимальная длина модулирующей секции и секции энергоотбора вдоль оси Z для длины волны излучения  $\lambda$  составляла соответственно  $\approx \lambda/5$  и  $\approx \lambda/2$ . Максимум мощности излучения достигался при 20–30%-ном превышении тока в диоде над критическим током секции энергоотбора. При образовании виртуального катода в электродинамической системе возбуждалась низшая мода прямоуголь-

ного волновода  $TE_{10}$ , которая излучалась в свободное пространство посредством прямоугольной рупорной антенны 6.

Измерение мощности излучения виркатора производилось с помощью калиброванных дипольных антенн суммированием по диаграмме направленности и ответвителем с коэффициентом ответвления 60 dB, встроенным в выходной волноводный тракт виркатора. Сигналы с антенны и ответвителя регистрировались скоростным осциллографом HP54720D.

Для формирования электронного пучка использовался металлоди-электрический взрывоэмиссионный катод с диаметром эмиссионной поверхности 55 mm. Напряжение на диод подавалось от генератора с индуктивным накопителем энергии и электрически взрываемым проволочным прерывателем тока [5]. Генератор (рис. 1) был собран в камере, заполненной смесью азота и элгаса с общим давлением 6 at, и состоял из накопительной индуктивности 7, прерывателя тока 8, обостряющего 9 и срезающего 10 разрядников и проходного секционированного вакуумного изолятора 11. Прерыватель тока был выполнен из 36 параллельно включенных медных проводников диаметром 71  $\mu\text{m}$  и длиной 80 cm. Рабочей средой для прерывателя служил воздух при атмосферном давлении. Форма выходного импульса напряжения корректировалась изменением зазоров в обостряющем и срезающем разрядниках. Накопительный конденсатор емкостью  $C \approx 4 \mu\text{F}$  заряжался до 70 kV и с помощью многозазорного пятиканального разрядника  $S$  [6] коммутировался на последовательно соединенные индуктивность  $L \approx 4.6 \mu\text{H}$  и прерыватель тока. Амплитуда тока короткого замыкания генератора составляла  $\sim 65 \text{ kA}$ , четверть периода колебаний  $\sim 6.6 \mu\text{s}$ . Срабатывание прерывателя происходило через  $\sim 4.5 \mu\text{s}$  после начала протекания тока. Под действием возникающего напряжения  $\sim 500 \text{ kV}$  пробивался обостряющий разрядник и накопительная индуктивность подключалась к диоду. Напряжение на катоде регистрировалось емкостным датчиком 12 [7], токи в накопительной индуктивности и диоде — поясом Роговского 13 и магнитной петлей 14.

В экспериментах виркатор настраивался на режим максимального КПД и требуемую частоту генерации путем изменения зазора между катодом и анодом, а также параметров электродинамической системы. При зазоре катод-анод 15 mm мощность микроволнового излучения достигала 300 MW на частоте 2.65 GHz. КПД генератора составлял около 5%, длительность микроволнового импульса по половинному



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения на катоде и тока электронного пучка.

уровню мощности — около 50 ns. Параметры электродинамической системы при этом были следующими: расстояние от плунжера 4 до оси пучка  $\sim 3\lambda_B/4$ , расстояние от плунжера 5 до оси пучка  $\sim 3\lambda_B/4$ , ширина вдоль оси  $X$  отверстия связи  $\sim \lambda_B/30$ , где  $\lambda_B$  — длина волны в волноводе. Диаграмма направленности достаточно хорошо соответствовала излучению волны  $TE_{10}$  из прямоугольного рупора 6. Характерные осциллограммы напряжения на катоде, тока пучка, радиосигнала и спектра микроволнового излучения приведены на рис. 2, 3. В течение импульса излучения напряжение на катоде уменьшалось с 520 до 300 кВ, ток пучка нарастал с 9 до 14 кА, т.е. импеданс вакуумного диода уменьшался примерно в 3 раза. Падение импеданса вакуумного диода в течение импульса могло быть обусловлено как увеличением количества и размера эмиссионных центров на поверхности катода [8], так и движением катодной плазмы. Тем не менее вид осциллограмм свидетельствует о том, что частота излучения виркатора не изменялась в течение импульса и определялась параметрами электродинамической системы. Варьирование частоты излучения осуществлялось изменением положения отверстия обратной связи и плунжера 4. Диапазон регулировки частоты излучения по половинному уровню мощности составлял около 20%.

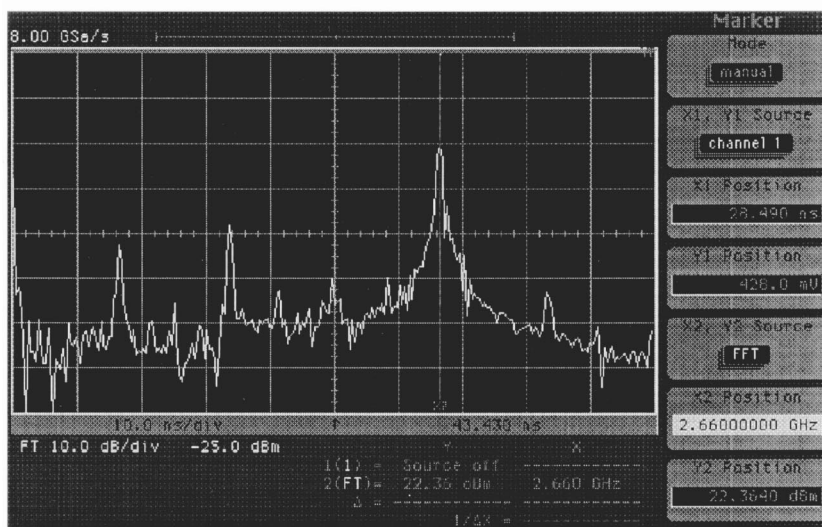
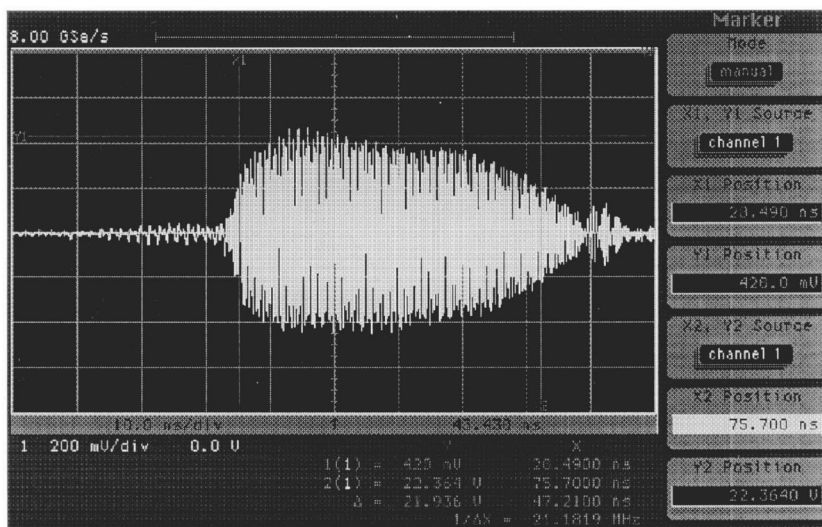


Рис. 3. Осциллограмма радиосигнала и спектр микроволнового излучения.

Таким образом, в данных экспериментах была реализована концепция виркатора с предмодуляцией электронного пучка на основе компактного генератора с индуктивным накопителем энергии. Мощность излучения составляла 300 MW при КПД около 5%. К достоинствам данного СВЧ-прибора можно отнести отсутствие внешнего фокусирующего магнитного поля, стабильность частоты излучения в течение импульса, возможность механической перестройки частоты путем изменения параметров электродинамической системы, адаптивность к изменению импеданса вакуумного диода, одномодовый состав излучения.

## Список литературы

- [1] Курилко В.И., Файнберг Я.В. // Письма в ЖТФ. 1976. В. 2. С. 397–400.
- [2] Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстетер С.И. и др. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. В. 4. С. 530–537.
- [3] Korovin S.D., Pegel I.V., Polevin S.D., Tarakanov V.P. // Proc. 11<sup>th</sup> Int. Pulsed Power Conf. Baltimore, 1997. P. 736–741.
- [4] Рухадзе А.А., Столбенцов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. В. 3. С. 385–396.
- [5] Efremov A.M., Kovalchuk B.M., Loginov S.V., Zherlitsin A.A. // Proc. 12<sup>th</sup> Symposium on High Current Electronics. Tomsk, 2000. P. 363–365.
- [6] Бастриков А.Н., Ким А.А., Ковальчук Б.М. и др. // Изв. вузов. Физика. 1997. № 12. С. 5–16.
- [7] Ekdahl C.A. // Rev. Sci. Instrum. 1980. V. 51. N 12. P. 1645–1648.
- [8] Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 97–101.