

© Е.И. АЗАРКЕВИЧ,
член-корреспондент АН СССР А.Н. ДИДЕНКО,
П.В. ДОЛГОПОЛОВ, А.Г. ЖЕРЛИЦЫН, В.П. ИСАКОВ,
А.А. ЛЕОНТЬЕВ, М.В. ЛОПАТИН, В.Б. МИНЦЕВ, А.Е. УШНУРЦЕВ,
Г.П. ФОМЕНКО, член-корреспондент АН СССР В.Е. ФОРТОВ,
В.И. ЦВЕТКОВ, В.Б. ШНЕЙДЕР, Б.К. ЯСЕЛЬСКИЙ

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГИИ ХИМИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Быстрый и устойчивый прогресс в разработке мощных импульсных генераторов когерентных колебаний микроволнового диапазона сделал возможным получение в лабораторных условиях интенсивных потоков СВЧ-излучения мультигигаваттного уровня мощностей при характерной энергии импульса в сотни джоулей [1–3]. Это открывает интересные перспективы использования таких потоков для направленного воздействия на конденсированные материалы и ионосферную плазму, для нагрева плазмы в термоядерных установках, для передачи электроэнергии из космоса на Землю, в радиолокации и связи, для функционального воздействия на клетки живого организма и т.п. Успешное решение этих задач связано с дальнейшим продвижением по шкале мощностей и энергий излучения, что уже сейчас лимитируется возможностями системы электропитания СВЧ-генераторов, в качестве которых используются емкостные накопители, являющиеся сложными, громоздкими и дорогостоящими инженерными сооружениями. В мегаджоульном диапазоне энергий реальной альтернативой емкостным накопителем являются взрывомагнитные генераторы (ВМГ) [4], использующие химическую энергию конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), которые имеют на 5–6 порядков более высокую плотность запасенной энергии. При этом, однако, возникает ряд нетривиальных проблем, вызванных несоответствием масштаба характерных кинетических энергий. Дело в том, что типичный уровень энерговыделений при детонации КВВ соответствует энергии валентных электронов и составляет величину порядка электрон-вольта, в то время как эффективное преобразование энергии электронного пучка в электромагнитное излучение осуществляется в релятивистском диапазоне $\epsilon \approx m_e c^2 \approx 0,5$ МэВ.

В данной работе для возбуждения интенсивного когерентного СВЧ-излучения использовали взрывомагнитные генераторы, действие которых основано на магнитной кумуляции при взрывном обжиге магнитного потока продуктами детонации химического ВВ. Эти устройства характеризуются высокой плотностью генерируемой энергии $\sim 10^8$ Дж/м³, удельной мощностью $\sim 10^{13}$ Вт/м³ при эффективности использования химической энергии КВВ до 10% [5–6].

Источником когерентного с частотой ~ 3 ГГц СВЧ-излучения выбран высоко-точный релятивистский генератор — виркатор на основе триода с виртуальным катодом [1], в котором энергия интенсивного релятивистского электронного пучка с КПД до 30–40% преобразуется в энергию электромагнитного поля при осцилляторном движении электронов в потенциальной яме, создаваемой реальными и виртуальными катодами. Механизмом формирования интенсивного электронного пучка

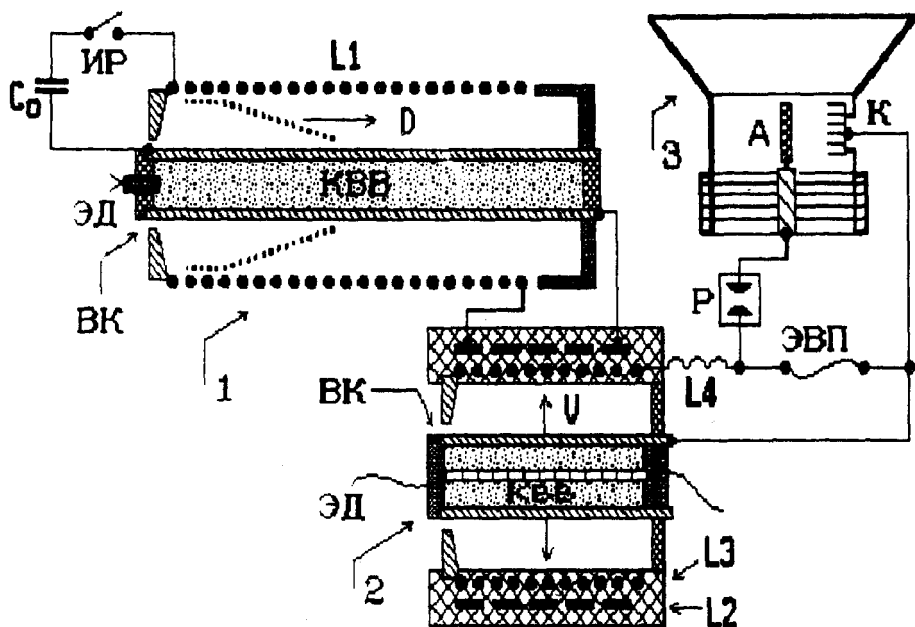


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – спиральный взрывомангнитный генератор, 2 – высоковольтный взрывомангнитный генератор, 3 – виркатор

является взрывная эмиссия [7], обеспечивающая на "холодных" катодах значительные (до 10^6 А/см²) плотности тока и требующая поэтому для своей реализации токов питания генератора в единицы–десятки килоампер. Важно, что при этом в виркаторе удается сформировать электронные потоки, интенсивности которых значительно превосходят предельный вакуумный ток без громоздкой системы создания внешнего фокусирующего магнитного поля и обеспечить рекордно высокие (до 20 ГВт [8]) мощности СВЧ-излучения при крайней простоте генерирующего устройства. Кроме того, в виркаторных системах удается регулировать частоту излучения от 0,5 до 30 ГГц, формировать диаграмму направленности излучения в телесном угле $\sim 20^\circ$, а также получать СВЧ-импульсы микросекундной длительности [9].

Вместе с тем физические особенности генерации СВЧ-излучения в триоде предъявляют жесткие требования системе электропитания, которая должна обеспечить импульсы напряжения ≥ 300 кВ с крутым ($\leq 10^{-7}$ с) фронтом нарастания при токах ≥ 10 кА. С этой целью были разработаны специальные высоковольтные взрывомангнитные генераторы [10, 11] спиральной конструкции с осевым инициированием заряда КВВ. От других ВМГ их отличает способность реализовать импульсы напряжения ~ 200 кВ непосредственно на генераторе при небольшом количестве КВВ ~ 600 г за счет быстрого (~ 5 – 15 мкс) изменения большой начальной индуктивности генератора. Начальный магнитный поток ~ 1 Вб создается разрядом конденсаторной батареи или силового спирального ВМГ на "рабочую" спираль высоковольтного генератора или дополнительную внешнюю спираль, осуществляя режим с "перехватом" магнитного потока [12]. Конструкция генератора обеспечивает на согласованной нагрузке электрические импульсы энергией 50 кДж и мощностью ~ 10 ГВт.

В первой серии экспериментов 1987 г. по взрывной генерации СВЧ-излучения для формирования электрического импульса ~ 350 кВ и согласования импе-

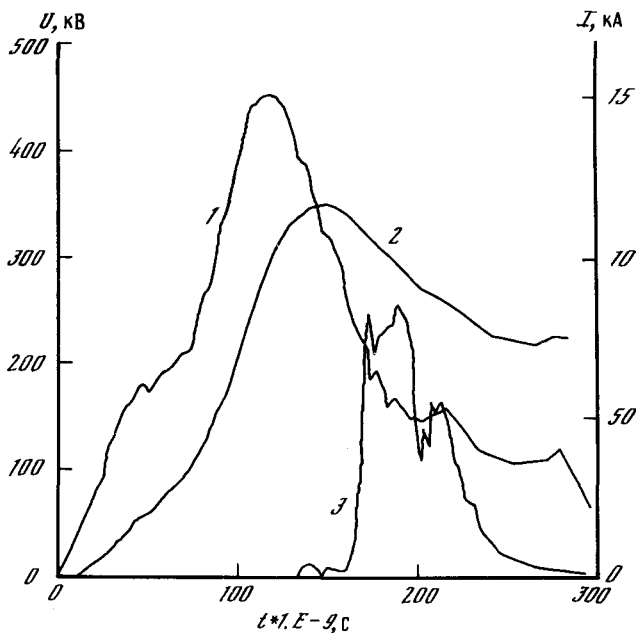


Рис. 2. Характерные осциллограммы импульсов на триоде: 1 — напряжения, 2 — тока, 3 — мощности СВЧ-излучения

дансов ВМГ и виркатора использовали повышающий импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации ~ 4 и обостряющий газонаполненный разрядник. Зарегистрированная мощность излучения ($\sim 10^5$ Вт) ограничивалась недостаточной скоростью нарастания электрического импульса. Перемыкание анод-катодного промежутка ионной плазмой наступало раньше момента достижения критических для мощной генерации электронных токов. Введение во вторичную цепь обостряющей емкости $\sim 1\text{--}30$ нФ позволило повысить мощность излучения до 10^6 Вт при длительности ~ 700 нс.

Для создания импульса электропитания оптимальной для виркатора крутизны, интенсивности и длительности в последующих экспериментах использовалась система (рис. 1) на основе силового спирального ВМГ, выполняющего роль энергетического источника, "быстрого" ВМГ с осевым иницированием, взрывающихся проволочек и газонаполненного разрядника. От небольшой емкости $C_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ Ф напряжением 5 кВ осуществляется запитка спирального ВМГ L_1 с зарядом КВВ 700 г, который усиливает электрическую энергию в нагрузке — внешнем соленоиде высоковольтного ВМГ L_2 — до 50 кДж. Заряд взрывчатого вещества второго каскада иницируется таким образом, чтобы замыкание вторичной цепи взрывным ключом ВК произошло в момент максимума тока в L_2 . При расширении лайнера высоковольтного генератора магнитный поток "перехватывается" внутренним соленоидом L_3 , вызывая появление тока в цепи электровзрывного прерывателя (ЭВП). Высоковольтный ВМГ работает 6–8 мкс, вырабатывая напряжение до 200 кВ при токе до 25 кА. ЭВП представляет собой набор из нескольких десятков параллельно соединенных медных проводников диаметром 40–50 мкм длиной 0,5–1 м, помещенных в азот под давлением 0,4 МПа. Геометрические размеры проволочек подбирались таким образом, чтобы максимальная скорость роста их электросопротивления (стадия собственно электрического взрыва) достигалась в конце работы

ВМГ. В связи с тем, что конструкция высоковольтного генератора выдерживала напряжения до 200 кВ, в ряде экспериментов между ВМГ и ЭВП включалась накопительная индуктивность L_4 . Возникающее при размыкании тока перенапряжение приводит к пробоев разрядника P , и высоковольтный импульс прикладывается к аноду A виркатора, вызывая взрывную эмиссию с катода K , формирование электронного пучка и генерацию СВЧ-излучения.

В результате к виркатору подводились импульсы напряжения до 450 кВ длительностью 180–500 нс и крутизной переднего фронта ~ 60 нс. Амплитуда тока в триоде достигала 12 кА, что соответствует мощности релятивистского электронного пучка ~ 5 ГВт.

Параметры электромагнитного излучения измерялись с точностью $\sim 30\%$ при $\lambda = 10 \pm 0,5$ см детекторной головкой на основе лампового СВЧ-диода, тарировка которого осуществлялась в специальной серии экспериментов. Пиковая мощность выведенного в атмосферу СВЧ-излучения составила не менее 100 МВт при длительности сигнала 100–200 нс. Типичные осциллограммы импульсов напряжения и тока на триоде, а также огибающая СВЧ-импульса приведены на рис. 2. Видно несоответствие моментов достижения максимальных напряжения, тока и мощности излучения, что говорит о недостаточной согласованности элементов схемы в проведенных экспериментах. Анализ полученных результатов показывает, что при их оптимизации возможно получение электронных потоков с энергией ≥ 1 МэВ и достижение мультитигаваттного уровня СВЧ-излучения без существенных изменений параметров разработанных устройств.

Таким образом, проведенные эксперименты продемонстрировали возможность генерации мощного СВЧ-излучения с помощью энергии взрывчатых веществ.

Авторы выражают благодарность акад. Е.П. Велихову и акад. Г.А. Мезяцу за интерес к работе и стимулирующие обсуждения.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Черноголовка Московской обл.

Поступило
26 IV 1991

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н., Арзин А.П., Жерлицын А.Г. и др. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1984, вып. 4, с. 104–118.
2. Бугаев С.П., Канавец В.Н., Климов А.И. и др. – РЭ, 1987, т. 32, № 7, с. 1488–1498.
3. Burkhardt S. – J. Appl. Phys., 1987, vol. 62, № 1, p. 75–78.
4. Бродский А.Я., Вдовин В.А., Корженевский А.В. и др. – ДАН, 1990, т. 314, № 4, с. 846–849.
5. Сахаров А.Д., Людаев Р.З., Смирнов Е.Н. и др. – ДАН, 1965, т. 165, № 1, с. 65–68.
6. Павловский А.И., Людаев Р.З. В сб.: Вопр. современной экспериментальной и теоретической физики. М.: Наука, 1984, с. 206.
7. Мезяц Г.А., Иванов С.А., Комяк Н.И., Пеликс Е.А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения. М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Bromborsky A., Kehs R.A., Hultin G.A. et al. IEEE Intern. Conf. in Plasma Science. Abstracts. Arlington, 1987, p. 39.
9. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Сулакшин А.С. и др. – Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, вып. 24, с. 1510–1513.
10. Жерлицын А.Г., Исаков В.П., Лопатин М.В. и др. – ТВТ, 1990, т. 28, № 5, с. 988–998.
11. Zherlitsin A.G., Isakov V.P., Lopatin M.V. et al. In: Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. N.Y.: Nova Sci. Publ., 1990, p. 607–613.
12. Давыдов В.А., Чернышев В.К. – ПМТФ, 1981, № 6, с. 112–117.