

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СУБНАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С УПРАВЛЯЕМЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ© 2023 г. Е. В. Балзовский^а, Ю. И. Буянов^а, А. М. Ефремов^а,
В. И. Кошелев^{а,*}, Э. С. Некрасов^а, С. С. Смирнов^а^аИнститут сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 26.08.2022 г.

После доработки 05.09.2022 г.

Принята к публикации 08.11.2022 г.

Разработан мощный источник сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны с офсетным отражателем. В фокусе отражателя расположена решетка 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемых четырехканальным формирователем биполярных импульсов напряжения с амплитудой 65 кВ и длительностью 0.5 нс на частоте повторения до 100 Гц. Реализованы режимы излучения с дискретным сканированием волновым пучком, а также с линейной, ортогональными и эллиптической поляризациями. Получены импульсы излучения с напряженностью поля 40–120 кВ/м на расстоянии 4.5 м.

DOI: 10.31857/S0032816223020143, EDN: GSNWFE

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные источники сверхширокополосного (СШП) излучения разрабатываются для исследований взаимодействия сильных электромагнитных полей с объектами [1, 2], а также для радаров с высоким пространственным разрешением [3]. В Институте сильноточной электроники СО РАН создана серия источников СШП-излучения на основе решеток комбинированных антенн, возбуждаемых высоковольтными биполярными импульсами длительностью 0.2–3 нс [4]. Наряду с многоэлементными решетками, во многих лабораториях разрабатываются мощные источники СШП-излучения на основе зеркальных антенн. Для возбуждения таких антенн используются одиночные излучатели следующих типов: ТЕМ [5], электрический диполь [6, 7] и комбинированная антенна [8]. В последнем случае использовался офсетный отражатель.

Каждое направление имеет свои достоинства. В источниках на основе решеток возможно управление характеристиками излучения, включая диаграмму направленности [9] и спектр излучения [10]. Зеркальные антенны привлекают к себе внимание простотой увеличения пиковой напряженности электрического поля E_p импульса излучения. Гибридные антенны, состоящие из отражателя, в фокусе которого располагается решетка, позволяют объединить достоинства двух

направлений в создании мощных источников СШП-излучения. В работе [11] предложена гибридная антенна на основе офсетного отражателя с решеткой 2×2 комбинированных антенн, возбуждаемых биполярным импульсом длительностью 0.5 нс. По результатам расчетов выбраны поперечные размеры антенны 65×60 мм². Была разработана и создана комбинированная антенна (КА) [12, 13] с требуемыми параметрами для применения в решетке 2×2 .

Целью данной работы является исследование и разработка мощного источника СШП-излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны. Важным элементом мощного источника является четырехканальный формирователь биполярных импульсов (ФБИ). В разработанных ранее четырехканальных ФБИ [9, 10] в каждом канале использовалась схема с двумя разрядниками и тремя коаксиальными линиями [14]. Разрядники расположены в одном газовом объеме, и для субнаносекундного времени их срабатывания требуется тщательная настройка межэлементных зазоров. Каждый разрядник имеет свой разброс времени срабатывания, что снижает стабильность по амплитуде и длительности выходных биполярных импульсов.

В данной работе с целью увеличения стабильности биполярных импульсов длительностью 0.5 нс впервые применена в каждом канале схема

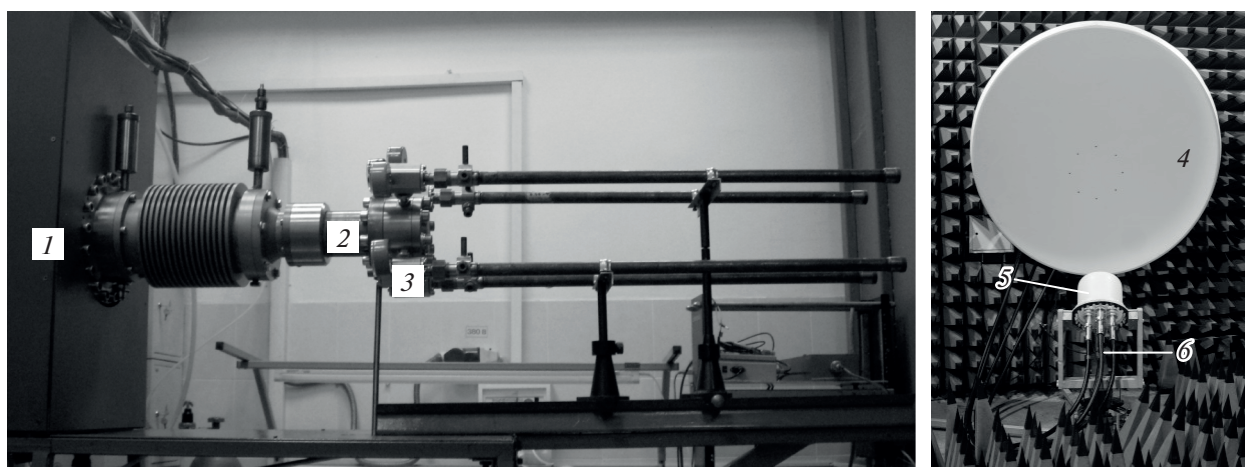


Рис. 1. Конструкция источника. 1 – генератор высоковольтных импульсов СИНУС-160; 2 – промежуточная ступень обострения; 3 – четырехканальный формирователь биполярных импульсов; 4 – офсетный отражатель; 5 – антенная решетка в диэлектрическом контейнере; 6 – коаксиальные кабели.

с одним разрядником. Ожидается, что сокращение общего числа разрядников с 9 до 5 в четырехканальном формирователе позволит повысить стабильность излученных импульсов и упростить процедуру настройки схемы формирователя.

2. КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Источник мощных СШП-импульсов (рис. 1) включает в себя генератор биполярных импульсов и гибридную антенну. Четырехканальный генератор биполярных импульсов состоит из генератора высоковольтных монополярных импульсов СИНУС-160 (1), промежуточной ступени обострения 2 и четырехканального формирователя биполярных импульсов 3. Гибридная антенна состоит из офсетного отражателя 4, в фокусе которого расположена решетка 2×2 комбинированных антенн 5. Антенная решетка располагается в диэлектрическом контейнере. Элементы решетки подключены к выходам генератора коаксиальными кордельными кабелями РК 50-17-51С (6). Кабели и диэлектрический контейнер заполнены газом SF₆ под давлением 5 и 1.5 атм соответственно.

3. ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Эквивалентная схема четырехканального генератора биполярных импульсов приведена на рис. 2. Схема содержит промежуточную ступень обострения и четыре идентичных формирователя биполярных импульсов F_1 – F_4 . В состав промежуточной ступени входят накопительная линия FL_1 и разрядник S_1 . Каждый формирователь собран по схеме с одним разрядником и содержит формирующие линии FL_{31} – FL_{34} и FL_{41} – FL_{44} , разде-

лительные линии FL_{21} – FL_{24} , передающие линии FL_{51} – FL_{54} , разрядники S_{21} – S_{24} и нагрузки R_{11} – R_{14} .

Схема моделировалась в программном продукте PSpice. Время коммутации, т.е. время, в течение которого сопротивление разрядника меняется от 100 кОм до 0.01 Ом, установлено для S_1 равным 0.75 нс, а для S_{21} – S_{24} – 0.2 нс. Промежуточная накопительная линия FL_1 заряжается за время 3 нс от генератора СИНУС-160 с частотой следования 100 Гц (рис. 3, кривая U_1). При срабатывании разрядника S_1 при напряжении, близком к максимальному 470 кВ, происходит зарядка за время 0.4 нс формирующих линий FL_{31} – FL_{34} и FL_{41} – FL_{44} через разделительные линии FL_{21} – FL_{24} (кривая U_2). При срабатывании разрядников S_{21} – S_{24} в максимуме зарядного напряжения 360 кВ в передающих линиях FL_{51} – FL_{54} , нагруженных на согласованные нагрузки R_{11} – R_{14} , формируются биполярные импульсы напряжения (кривая U_3). Амплитуды биполярных импульсов приблизительно равны половине зарядного напряжения на линиях FL_{31} – FL_{34} и FL_{41} – FL_{44} , а длительности – двойному суммарному пробегу в каждой паре из этих линий. Биполярные импульсы напряжения имеют небольшие предимпульсы, связанные с прохождением в нагрузки части зарядных импульсов через формирующие линии.

Конструкция промежуточной ступени обострения и блока формирователей биполярных импульсов F_1 – F_4 представлена на рис. 4 и состоит из шести газовых объемов. В первом объеме с внутренним диаметром 54 мм в среде азота под давлением 50 атм размещены линия FL_1 , многоканальный разрядник S_1 и емкостный делитель зарядного напряжения D_1 . В четырех независимых идентичных объемах с внутренними диаметрами 22 мм,

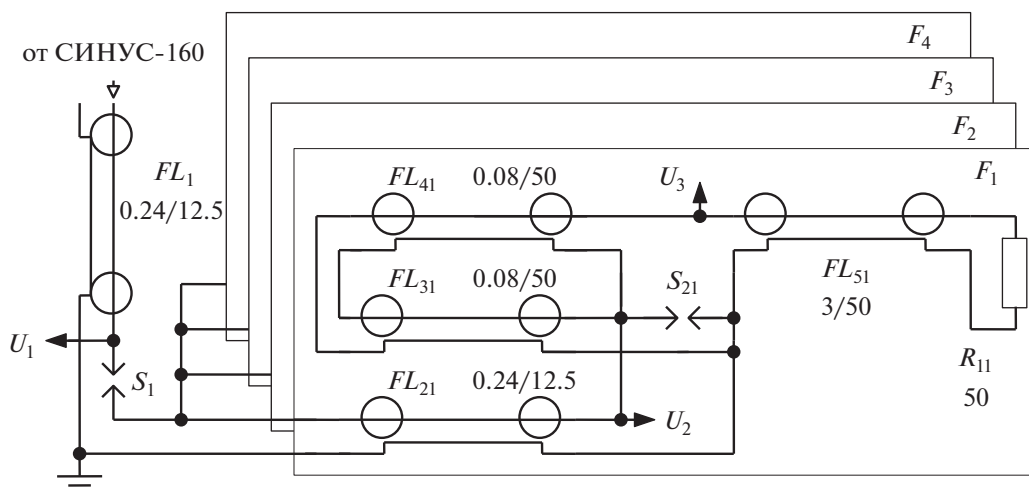


Рис. 2. Эквивалентная схема четырехканального генератора биполярных импульсов. *F* – формирователи; *FL* – коаксиальные линии (электрическая длина линии [нс]/ее волновое сопротивление [Ом]); *S* – разрядники; *R* – нагрузки.

ограниченных изоляторами *I* и изоляторами разделительных линий *FL*₂₁–*FL*₂₄, в среде азота под давлением 30–50 атм расположены линии *FL*₄₁–*FL*₄₄, *FL*₃₁–*FL*₃₄ и разрядники *S*₂₁–*S*₂₄. Электроды разрядника *S*₁ изготовлены из меди и встроены в концы линий. Для многоканального режима коммутации электроды этого разрядника установлены с зазором 1.4 ± 0.05 мм, согласно рекомендации работы [15]. Межэлектродное расстояние в разрядниках *S*₂₁–*S*₂₄ равно 0.3–0.4 мм. Оси четырех формирователей *F*₁–*F*₄ расположены в диаметрально противоположных точках на окружности с диаметром 220 мм. Давление азота в объемах промежуточной ступени обострения и в формирователях *F*₁–*F*₄ автоматически поддерживается с помощью пяти датчиков давления модели PSD-30 и десяти клапанов напуска и сброса газа. Идентичные по конструкции передающие линии *FL*₅₁–*FL*₅₄ со встроенными делителями напряже-

ния *D*₂₁–*D*₂₄ на связанных линиях и нагрузки *R*₁₁–*R*₁₄ имеют газовую (SF₆) изоляцию при давлении 5 атм.

Делители *D*₂₁–*D*₂₄ калибровались с помощью подачи биполярных импульсов напряжения с длительностями 0.5 нс на входы линий *FL*₅₁–*FL*₅₄ от низковольтных генераторов. Емкостный делитель *D*₁ не калиброван и служит для оценки времени зарядки напряжения на линии *FL*₁. Для регистрации выходных биполярных импульсов с

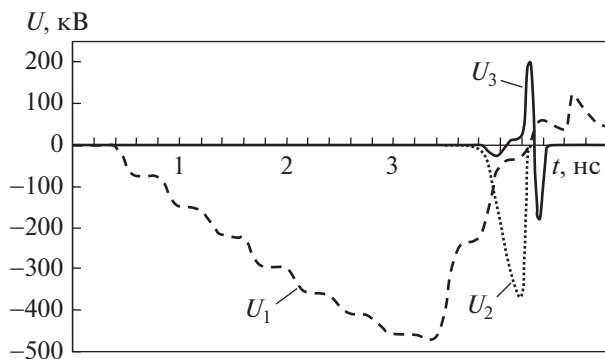


Рис. 3. Расчетные импульсы зарядных напряжений: *U*₁ – на линии *FL*₁; *U*₂ – на линиях *FL*₃₁, *FL*₄₁; *U*₃ – выходной биполярный импульс.

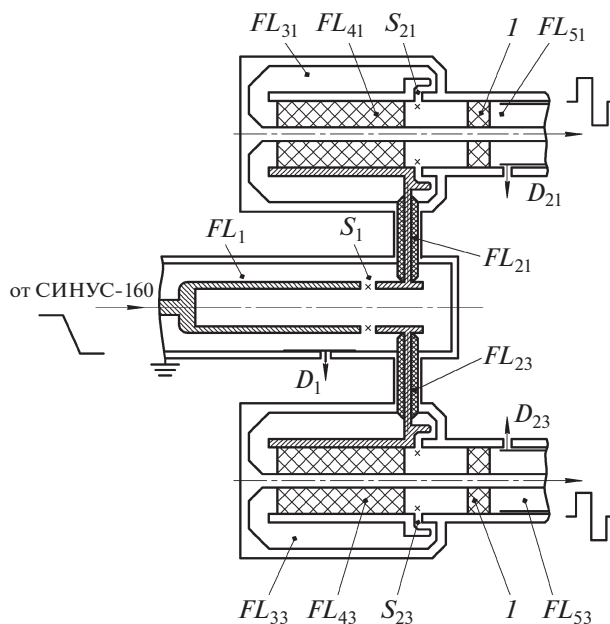


Рис. 4. Конструкция четырехканального формирователя биполярных импульсов. *I* – изоляторы; *D* – делители напряжения; *FL* – коаксиальные линии; *S* – разрядники.

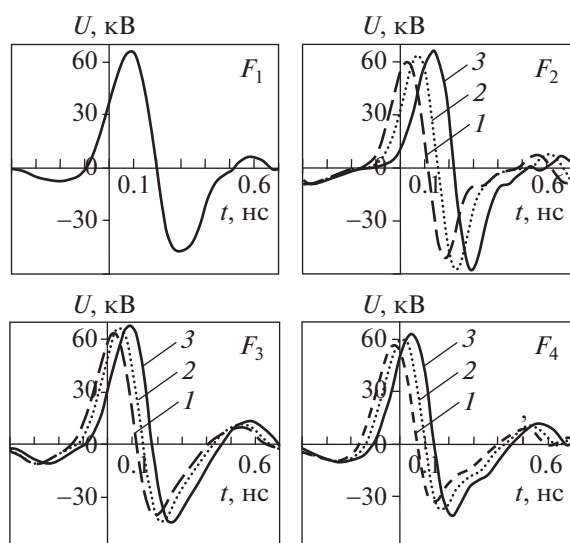


Рис. 5. Осциллограммы выходных биполярных импульсов, полученные с делителей D_{21} – D_{24} при давлениях: в канале F_1 – 50 атм, в каналах F_2 – F_4 – 40 (1), 45 (2) и 50 (3) атм.

делителей напряжения D_{21} – D_{24} и импульса зарядного напряжения с D_1 на линии FL_1 использовался осциллограф TDS 6604 с частотной полосой до 6 ГГц. Импульс зарядного напряжения на линию FL_2 поступал от генератора СИНУС-160, а выходные биполярные импульсы после последовательного срабатывания разрядников S_1 и S_{21} – S_{24} передавались по четырем передающим линиям FL_{51} – FL_{54} с волновым сопротивлением 50 Ом каждая либо в согласованные резистивные нагрузки при настройке генератора, либо в антенны. При указанных выше зазоре и давлении разрядник S_1 пробивался с задержкой, приблизительно равной 3 нс. При установке новых электродов через 5–7 мин работы генератора на частоте 100 Гц реализуется многоканальный режим работы с равномерной эрозией поверхности этих электродов.

На рис. 5 показаны осциллограммы выходных биполярных импульсов, полученные с делителей D_{21} – D_{24} . В качестве опорного сигнала для запуска осциллографа использовался выходной импульс канала F_1 при постоянном давлении 50 атм. Осциллограммы 1, 2 и 3 в каналах F_2 – F_4 получены при давлениях 40, 45 и 50 атм, соответственно. Амплитуды импульсов достигли 65 кВ. При среднем квадратичном разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 относительно средней амплитуды около 1% среднее квадратичное разброс амплитуд биполярных импульсов относительно средней для всех каналов F_1 – F_4 составил не более 2.5%. Стабильность выходных импульсов между каналами оценивалась измере-

нием разброса временного интервала t_1 от переднего фронта импульса канала F_1 до точки нулевого перехода другого канала. Для всех каналов среднее квадратичное отклонение разброса времени t_1 не превышало 10–15 пс. На этот режим генератор выходил через 5 мин после его включения. Длительность импульсов определялась путем аппроксимации передних и задних фронтов до пересечений с нулевыми линиями и составила около 0.5 нс. В отличие от схемы формирователя с разомкнутой линией, в данной схеме реализована более высокая стабильность заднего фронта импульса. Среднее квадратичное разброс заднего фронта импульса относительно переднего составил 8–10 пс, практически он равен стабильности развертки осциллографа.

При изменении давления в каналах F_2 – F_4 с 50 до 40 атм возможна регулировка задержки импульсов по времени в диапазоне 70–100 пс. При этом амплитуды импульсов уменьшаются на 6.5–16%. Вероятно, это связано с тем, что зарядные импульсы формирующих линий FL_{31} – FL_{34} и FL_{41} – FL_{44} не имеют плоской вершины.

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНОЙ АНТЕННЫ

Варианты размещения антенн в решетке-облучателе показаны на рис. 6. Антенны зафиксированы на фланце из оргстекла. Геометрические центры антенн расположены на окружности с диаметром 125 мм. Выбрано два варианта размещения антенн: для излучения импульсов с линейной (рис. 6а) и ортогональными либо эллиптической (рис. 6б) поляризациями. Отметим, что полоса частот согласования элемента решетки (0.94–6.45 ГГц) при коэффициенте стоячей волны по напряжению (КСВН) ≤ 2.5 уже, чем для изолированной антенны (0.94–6.7 ГГц) [12]. Излучение импульсов с эллиптической поляризацией достигается путем внесения временной задержки между двумя парами элементов антенной решетки с ортогональными поляризациями. Для варианта размещения антенн, показанного на рис. 6а, реализован режим сканирования волновым пучком путем внесения временного сдвига 1 нс между биполярными импульсами, питающими элементы решетки-облучателя. Временная задержка регулируется изменением длины коаксиальных кабелей, подключенных к антенным элементам. Антенны имеют локальный центр излучения на расстоянии 5.5 мм от апертуры [13]. Центр излучения антенной решетки-облучателя совмещен с фокусом офсетного отражателя. Отражатель представляет собой вырезку из параболоида вращения диаметром 1400 мм. Фокусное расстояние отражателя составляет 700 мм.

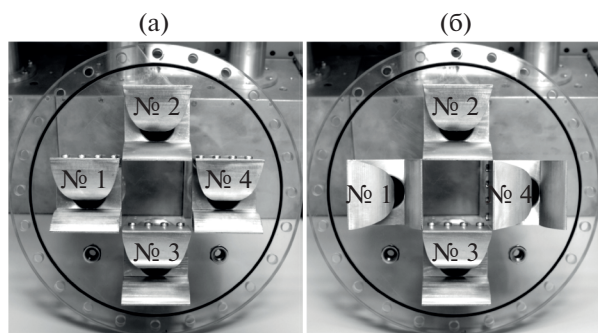


Рис. 6. Варианты размещения антенн № 1–№ 4 в решетке-облучателе для излучения импульсов с линейной (а), ортогональными и эллиптической (б) поляризациями.

Проведены экспериментальные исследования характеристик гибридной антенны при возбуждении низковольтными биполярными импульсами. В качестве источника низковольтных импульсов использован генератор биполярных импульсов напряжения производства НПП ТРИМ (<https://trimcom.ru/main-page/catalog/generatory-radioimpulsov/>), подключенный к элементам облучателя через широкополосный делитель мощности 1:4. Для регистрации излученного поля использованы ТЕМ-антенна с размерами апертуры 400×80 мм [16] и комбинированная антенна с поперечными размерами 75×75 мм [17]. Приемная антенна была расположена на расстоянии от 4.17 до 4.5 м от точки фокуса отражателя. Гибридная антенна установлена на опорно-поворотном устройстве. Сигнал с выхода приемной антенны регистрировался стробоскопическим осциллографом ТРИМ TMR8112 (<https://trimcom.ru/main-page/catalog/cifrovye-stroboskopicheskie-oscillogrffy/>) с полосой до 12 ГГц.

Распределение по пиковой напряженности поля для гибридной антенны в режиме сканирования волновым пучком показано на рис. 7. Сканирование в H -плоскости (рис. 7а) осуществлялось при возбуждении с временной задержкой элементов решетки-облучателя № 1 (1) и № 4 (2), а в E -плоскости (рис. 7б) – при возбуждении элементов решетки-облучателя № 2 (3) и № 3 (4). Нумерация элементов решетки указана на рис. 6.

При сканировании в H -плоскости наблюдается симметрия распределения поля. Максимум излучения при возбуждении элемента № 1 направлен на угол -4° , при возбуждении элемента № 4 – на угол $+4^\circ$. Угловая ширина распределения поля по уровню 0.707 одинакова для обоих случаев и составила 7.7° . Уровень кроссполяризации составил не более 0.25 относительно основной поляризации. В E -плоскости максимум излучения при возбуждении антенны № 2 направлен на угол -3.5° . Ширина распределения по уровню 0.707

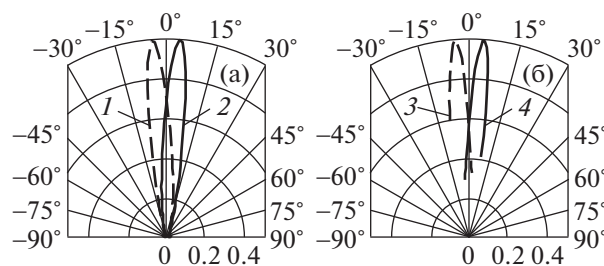


Рис. 7. Распределение пиковой напряженности поля гибридной антенны в режиме сканирования волновым пучком: а – в H -плоскости при возбуждении элементов решетки-облучателя № 1 (1) и № 4 (2); б – в E -плоскости при возбуждении элементов решетки-облучателя № 2 (3) и № 3 (4).

составила 7.1° . При возбуждении с задержкой антенны № 3 максимум излучения направлен на угол $+5^\circ$, ширина распределения поля составила 6.6° . Уровень кроссполяризации составил не более 0.07 относительно основной поляризации.

Осциллограмма излученных гибридной антенной низковольтных импульсов в режиме сканирования волновым пучком показана на рис. 8. Импульсы на осциллограмме соответствуют следующим антеннам: 1 – № 4; 2 – № 3; 3 – № 1 (в максимуме распределения поля); 4 – № 2. Задержка между соседними импульсами составляет 1 нс. Оценена эффективность по пиковой напряженности электрического поля: $k_E = rE_p/U_{g\max}$, где r – расстояние, $U_{g\max}$ – максимальная амплитуда импульса напряжения. Пиковая напряженность поля E_p определяется выражением $E_p = U_p/l_e$, где U_p – пиковая амплитуда напряжения на выходе приемной антенны, l_e – эффективная длина приемной антенны. Для ТЕМ-антенны $l_e = 3.84$ см на частоте 2 ГГц, соответствующей максимуму спектра излучения, вблизи которого сосредоточена основная часть энергии излучения. Средняя величина k_E в режиме сканирования волновым пучком составляет 6.12.

При синхронном возбуждении элементов облучателя максимум излучения направлен по оси, ширина распределения поля в H -плоскости составляет 8.3° , величина кроссполяризованной компоненты поля не превышает 0.21 относительно амплитуды основной поляризации. В E -плоскости ширина волнового пучка 9° , амплитуда кроссполяризованной компоненты не превышает 0.04. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E = 15.9$.

Распределение поля гибридной антенны в режиме излучения импульсов с ортогональными поляризациями приведено на рис. 9. Две пары антенн облучателя: № 1 + № 4 и № 2 + № 3 – возбуждались биполярными импульсами с задержкой 1 нс между ними. Распределение поля в

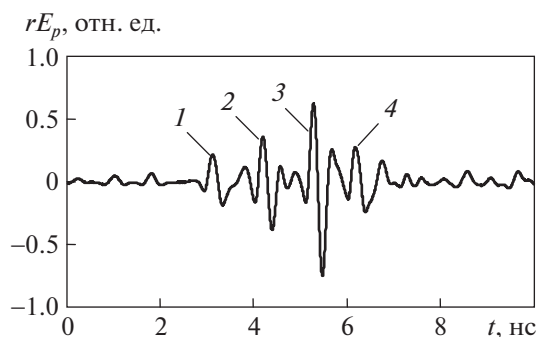


Рис. 8. Осциллограмма излученных импульсов в режиме сканирования волновым пучком. Импульсы соответствуют следующим антеннам: 1 — № 4; 2 — № 3; 3 — № 1 (в максимуме распределения поля); 4 — № 2.

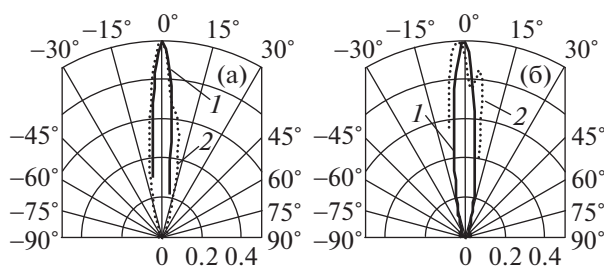


Рис. 9. Распределение пиковой напряженности поля гибридной антенны в режиме излучения импульсов с ортогональными поляризациями в H - (а) и E -плоскости (б) при возбуждении антенн решетки-облучателя № 1 + № 4 (1) и № 2 + № 3 (2).

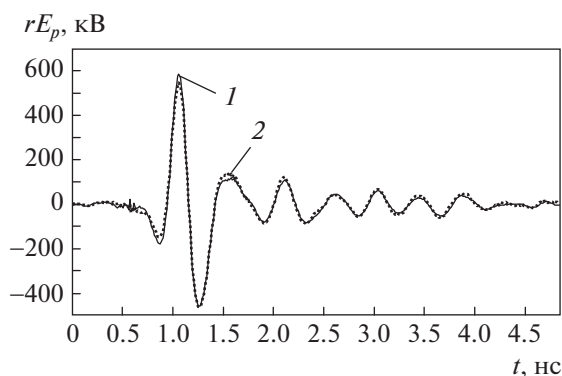


Рис. 10. Осциллограммы импульсов излучения при синхронном возбуждении антенн решетки-облучателя и частотах повторения импульсов 10 (1) и 100 Гц (2).

H -плоскости (рис. 9а) при синхронном возбуждении элементов № 1 + № 4 (кривая 1) имеет ширину 7.8° , величина кроссполяризации не превышает 0.11 во всем диапазоне измерения. При синхронном возбуждении элементов № 2 + № 3 (кривая 2) ширина волнового пучка составляет

8° , а величина кроссполяризации не превышает 0.22. Ширина волнового пучка в E -плоскости (рис. 9б) по уровню 0.707 относительно амплитуды при синхронном возбуждении элементов № 1 + № 4 (кривая 1) составляет 8.3° , уровень кроссполяризации не превышает 0.21. При синхронном возбуждении элементов № 2 + № 3 (кривая 2) ширина пучка 14° , величина кроссполяризационной компоненты поля 0.05.

5. ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Проведены экспериментальные исследования по излучению мощных СШП-импульсов гибридной антенной. На вход элементов решетки поступали биполярные импульсы с пиковой мощностью 84.5 МВт. Суммарная пиковая мощность импульсов напряжения на входе 4-элементной решетки была 338 МВт. В измерениях использовалась приемная ТЕМ-антенна, расположенная на расстоянии 4.5 м от точки фокуса отражателя. Запись осциллограмм проводилась осциллографом Keysight MR608A с полосой пропускания 6.3 ГГц.

На рис. 10 приведены осциллограммы зарегистрированных импульсов излучения при синхронном возбуждении антенн решетки-облучателя и частотах повторения импульсов 10 (кривая 1) и 100 Гц (кривая 2). Спектр излучения по уровню -10 дБ, оцененный с помощью преобразования Фурье, находился в диапазоне частот 0.9–3.16 ГГц. Максимуму спектра соответствовала частота 2.05 ГГц. Произведение rE_p равно 580 кВ при частоте повторения 10 Гц и 540 кВ при частоте повторения 100 Гц. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E = 8.9$ при частоте повторения 10 Гц и $k_E = 8.3$ при частоте повторения 100 Гц. В последнем случае оцененная пиковая плотность мощности излучения в приближении дальней зоны (плоской волны) равнялась 38 МВт/м².

Осциллограммы зарегистрированных импульсов излучения в режиме сканирования волновым пучком показаны на рис. 11. Элементы решетки возбуждались последовательно импульсами с временной задержкой 1 нс. Осциллограммы приведены при углах поворота гибридной антенны, соответствующих максимумам излучения антенны. В H -плоскости при возбуждении антенн № 4 (рис. 11а) и № 1 (рис. 11б) произведение пиковой напряженности поля на расстояние составило 220 кВ. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E \approx 3.4$. В E -плоскости при возбуждении антенн № 3 (рис. 11в) и № 2 (рис. 11г) произведение пиковой напряженности поля на расстояние составило 210 и 200 кВ соответственно. Эффективность по пиковой напряженности поля $k_E \approx 3.2$ при возбуждении антенны № 3 и $k_E \approx 3.1$ при возбуждении антенны № 2. Измерения в ре-

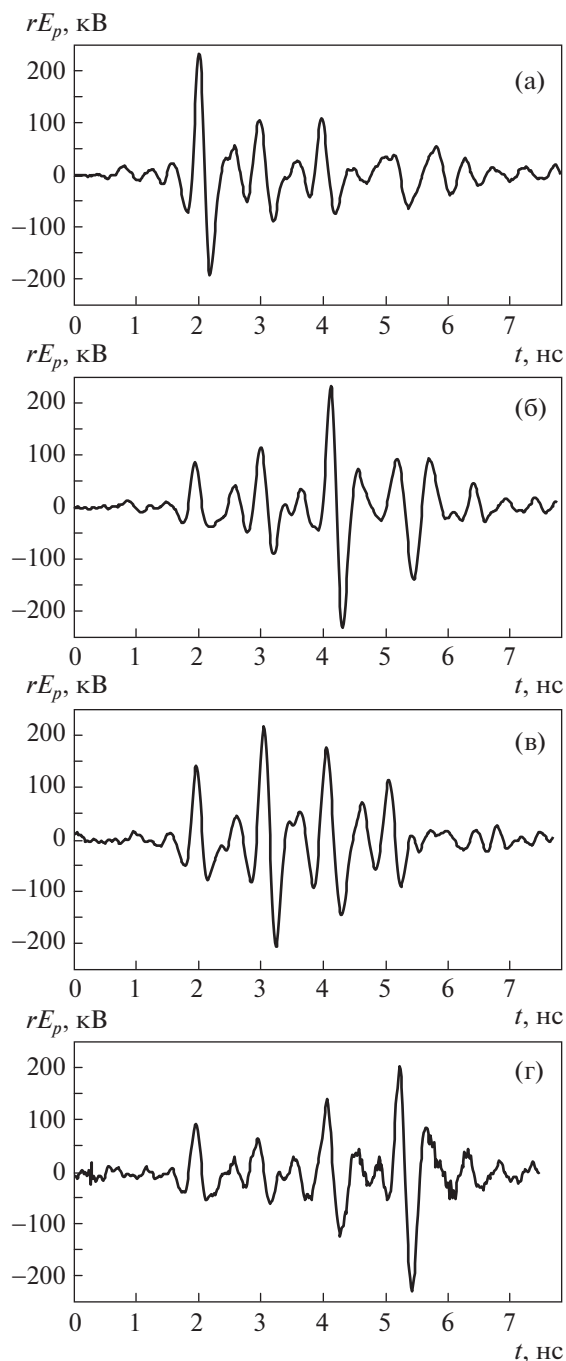


Рис. 11. Осциллограммы импульсов излучения в режиме сканирования волновым пучком для антенн № 4 (а), № 1 (б), № 3 (в) и № 2 (г).

жиме сканирования проведены при частоте повторения импульсов 10 Гц.

Меньшее значение k_E по сравнению с низковольтными измерениями обусловлено различием форм импульсов и потерями мощности в кабелях РК 50-17-51С длиной до 4 м. Амплитудно-частотная характеристика кабельного тракта по уровню

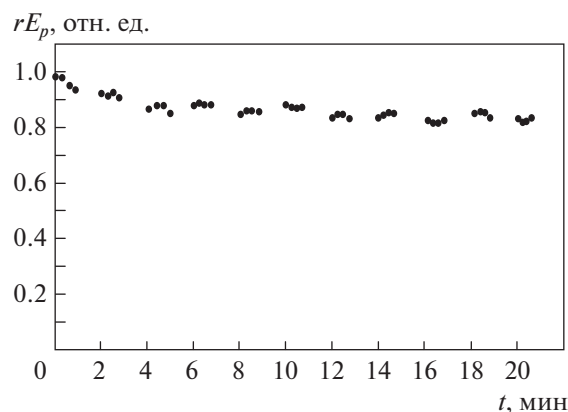


Рис. 12. Зависимость произведения пиковой напряженности поля на расстояние от времени при частоте повторения импульсов 100 Гц.

–3 дБ находилась в пределах 0–6.75 ГГц. Линейность фазочастотной характеристики ($\pm 11.25^\circ$) соответствовала частотной полосе 0–4 ГГц. При этом в полосе частот 0–4.9 ГГц величина КСВН не превышала 2.5.

Результаты измерений излучения гибридной антенны при частоте повторения импульсов 100 Гц на протяжении 20 мин приведены на рис. 12. Среднее значение пиковой напряженности поля падает не более чем на 18%. При этом основное падение наблюдается в течение первых 5–7 мин, что соответствует времени установления многоканального режима работы разрядников генератора.

Проведен эксперимент по излучению мощных импульсов с эллиптической поляризацией. На рис. 13 показаны годографы излученного гибридной антенной поля при синхронном изменении давления в двух каналах генератора. В оставшихся двух каналах давление постоянно и составляло 50 атм. Изменение давления в двух каналах генератора приводит к возбуждению с временной задержкой пары антенн решетки-облучателя с ортогональной поляризацией. Расположение элементов решетки соответствует рис. 6б. При давлении 50 атм (кривая 1) задержка импульсов между двумя парами антенн мала и поляризация близка к линейной. При дальнейшем уменьшении давления в двух каналах генератора временная задержка увеличивается, что приводит к изменению годографа и увеличению коэффициента эллиптичности излученного поля. Отметим также, что с уменьшением давления уменьшается амплитуда импульсов напряжения. Оценка коэффициента эллиптичности проведена по среднеквадратичному отклонению компонент поля E_y и E_x . При давлении 50 атм коэффициент эллиптичности равен 0.14; при 45 атм (кривая 2) – 0.16; при 40 атм (кривая 3) – 0.23; при 35 атм – 0.33; при

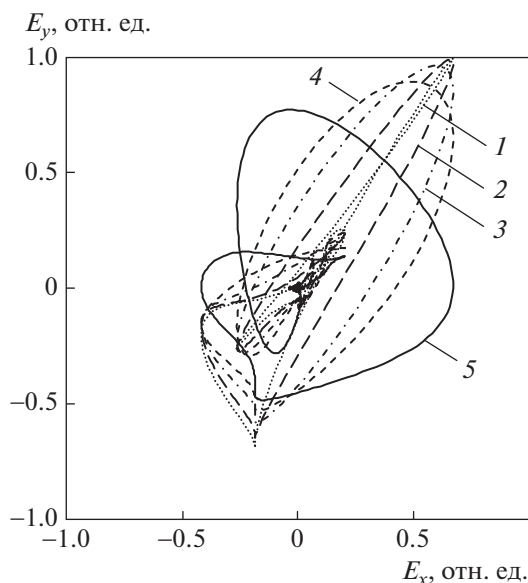


Рис. 13. Изменение годографа излученного поля при различном давлении в разрядниках двух каналов генератора: 50 (1); 45 (2); 40 (3); 35 (4); 30 атм (5).

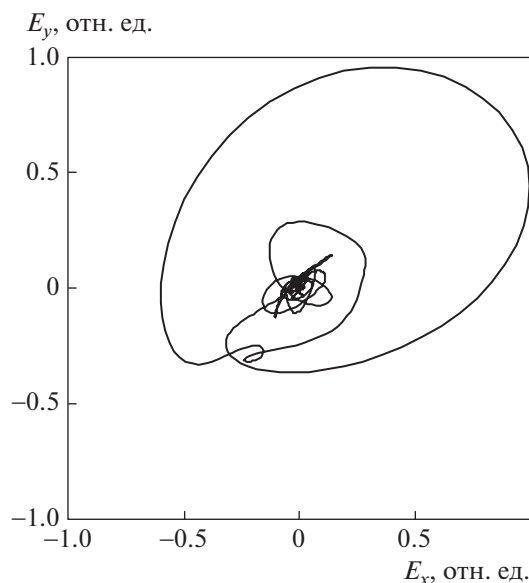


Рис. 14. Годограф поля при задержке 120 пс между импульсами излучения с ортогональными поляризациями.

30 атм — 0.74. Произведение rE_p при этом изменяется от 330 до 255 кВ.

По результатам расчетов максимальный коэффициент эллиптичности достигается при задержке импульсов между двумя парами антенн 120 пс. На рис. 14 показан годограф излученного гибридной антенной поля при возбуждении высоковольтными биполярными импульсами и задержке между импульсами с ортогональными поляризациями 120 пс. Давление во всех каналах генератора было 50 атм, а временная задержка регулировалась отрезками коаксиального кабеля. Коэффициент эллиптичности составил 0.74. При этом произведение rE_p достигало 290 кВ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан мощный источник сверхширокополосного излучения субнаносекундной длительности на основе гибридной антенны. Реализованы режимы излучения с дискретным сканированием волновым пучком, а также с линейной, ортогональными и эллиптической поляризациями. Получены мощные импульсы излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние до 540 кВ в режиме синхронного возбуждения антенн облучателя при частоте повторения до 100 Гц. В режиме дискретного сканирования волновым пучком получены импульсы излучения с произведением пиковой напряженности поля на расстояние до 220 кВ при частоте повторения 10 Гц. В режиме излучения с эллиптической поляризацией поля получены импульсы с произве-

дением пиковой напряженности поля на расстояние 255–290 кВ и коэффициентом эллиптичности до 0.74.

Разработан новый четырехканальный формирователь биполярных импульсов длительностью 0.5 нс с амплитудами импульсов до 65 кВ. Реализован режим управления временной задержкой при изменении давления в каналах генератора. При изменении давления в каналах с 50 до 40 атм задержка импульсов по времени возрастала до 100 пс. При этом амплитуды импульсов уменьшались на 16%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-08-00529.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Giri D.V.* High-power Electromagnetic Radiators (Nonlethal Weapons and Other Applications). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 2004.
2. *Giri D.V., Hoad R., Sabath F.* High-power Electromagnetic Effects on Electronic Systems. Boston, London: Artech House, 2020.
3. Ultra-Wideband Radar Technology / Ed. by J.D. Taylor. Boca Raton: CRC Press, 2001.
4. *Koshelev V.I., Buyanov Yu.I., Belichenko V.P.* Ultrawideband Short-Pulse Radio Systems. Boston, London: Artech House, 2017.
5. *Giri D.V., Lachner H., Smith I.D., Morton D.W., Baum C.E., Marek J.R., Prather W.D., Scholfield D.W.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. Iss. 2. P. 318.

6. *Ryu J., Lee J., Chin H., Yeom J.-H., Rom H.-T., Kwon H.-O., Han S.H., Choi J.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2013. V. 41. Iss. 8. P. 2283.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2272472>
7. *Фортв В.Е., Исаенков Ю.И., Михайлов В.М., Нестеров Е.В., Остапьев В.Е., Семенов Ю.В., Строганов В.А.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 11. С. 1102.
<https://doi.org/10.7868/S0033849413110041>
8. *Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E., Gubanov V., Stepchenko A., Efremov A.* // 20th Int. Symp. on High-Current Electronics (ISHCE). NY.: IEEE, Inc., 2018. P. 80.
<https://doi.org/10.1109/ISHCE.2018.8521226>
9. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 61.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213030038>
10. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Плиско В.В., Севостьянов Е.А.* // ПТЭ. 2019. № 1. С. 36.
<https://doi.org/10.1134/S003281621806006X>
11. *Буянов Ю.И., Балзовский Е.В., Кошелев В.И., Некрасов Э.С.* // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 111.
<https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/111>
12. *Balzovsky E., Buyanov Y., Koshelev V., Nekrasov E.* // Microw. Opt. Technol. Lett. 2021. V. 63. Iss. 11. P. 2866.
<https://doi.org/10.1002/mop.32994>
13. *Balzovsky E.V., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I., and Nekrasov E.S.* // 2nd Int. Conf. on Advances in Materials, Systems and Technologies (CAMSTech). NY.: AIP, Inc., 2022. V. 2467. P. 060021.
<https://doi.org/10.1063/5.0092398>
14. *Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., and Sukhushin K.N.* // Laser Part. Beams. 2003. V. 21. Iss. 2. P. 211.
<https://doi.org/10.1017/S0263034603212088>
15. *Ефремов А.М.* // ПТЭ. 2017. № 4. С. 90.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217040036>
16. *Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В.* // Доклады 5 Всероссийской научно-технической конференции “Радиолокация и радиосвязь”. М.: ИРЭ РАН, 2011, С. 77.
17. *Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М., Плиско В.В., Сухушин К.Н.* // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77.