

ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2013 г. А. М. Ефремов, В. И. Кошелев, Б. М. Ковальчук, В. В. Плиско

Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 25.06.2012 г.

Описан источник сверхширокополосного излучения наносекундной длительности, четыре выходных биполярных импульса которого могут быть синхронизованы со среднеквадратичным разбросом менее 100 пс по времени перехода напряжения через нуль или задержаны по моменту этого перехода в одних формирователях относительно других на время до 300 пс регулированием давления в двухэлектродных разрядниках. При длительности биполярного импульса напряжения 3 нс получен эффективный потенциал излучения 400 кВ на частоте повторения импульсов 100 Гц. Продемонстрирована возможность сканирования волновым пучком в пределах 12° .

DOI: 10.7868/S0032816213030038

ВВЕДЕНИЕ

Для решения ряда задач, таких как радиолокация с высоким пространственно-временным разрешением удаленных объектов ($R = 10\text{--}100$ км), а также устойчивость радиоэлектронных систем в условиях воздействия сильных электромагнитных полей, необходимы импульсы сверхширокополосного (с.ш.п.) излучения с эффективным потенциалом $E_p R = 1\text{--}10$ МВ, где E_p – пиковая напряженность электрического поля в дальней зоне на расстоянии R .

В настоящее время создана линейка мощных источников с.ш.п.-излучения по схеме: генератор монополярных импульсов – формирователь биполярных импульсов – волновой трансформатор импедансов с многоканальным делителем мощ-

ности – многоэлементная антенная решетка [1–6]. В источниках с числом элементов в решетке до 64 при длительностях биполярного импульса напряжения от 0.25 до 3 нс получены импульсы с.ш.п.-излучения с эффективным потенциалом до 2.8 МВ на частоте повторения 100 Гц.

Для дальнейшего роста эффективного потенциала с.ш.п.-излучения необходимо увеличивать амплитуду биполярного импульса напряжения и снижать выходное волновое сопротивление формирователя, чтобы увеличить число элементов в решетке. Однако при таком подходе существуют следующие ограничения. Во-первых, в формирующих линиях с низким волновым сопротивлением (единицы ом) трудно обеспечить высокие рабочие напряжения из-за малых зазоров между проводниками. Во-вторых, растут потери энер-

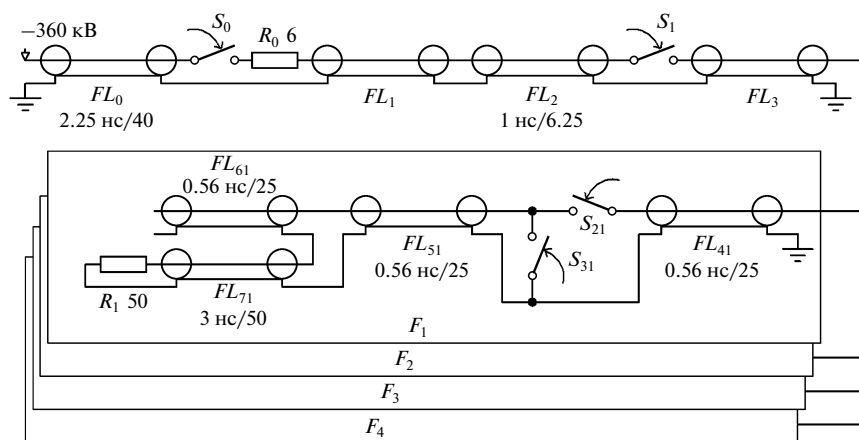


Рис. 1. Принципиальная схема генератора биполярных импульсов. FL – линии; S – разрядники; $R_1\text{--}R_4$ – нагрузки; R_0 – ограничительное сопротивление; $F_1\text{--}F_4$ – формирователи.

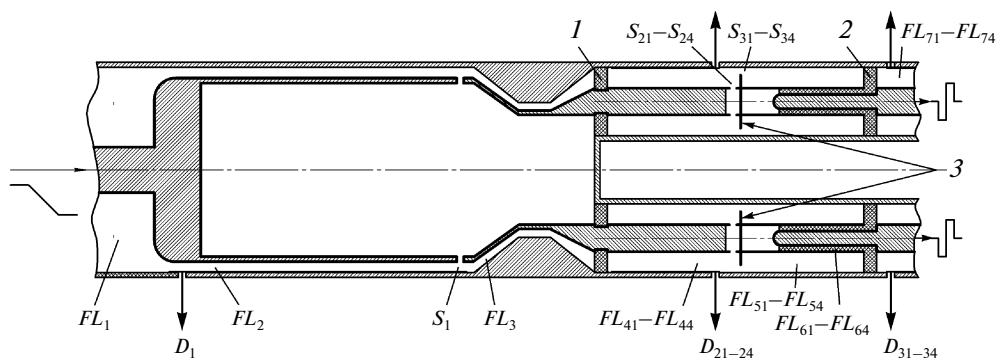


Рис. 2. Конструкция промежуточной ступени обострения и блока формирователей биполярных импульсов. FL — линии, S — разрядники, D — делители напряжения; 1 и 2 — изоляторы, 3 — дисковые электроды.

гии в фидерной системе при увеличении числа элементов в решетке.

В данной работе представлен другой подход к созданию мощного с.ш.п.-источника. Он состоит в том, что используется один генератор монополярных импульсов, а количество элементов в решетке равно числу формирователей биполярных импульсов. Основная проблема здесь заключается в обеспечении малого разброса времени между выходными биполярными импульсами формирователей.

При длительности биполярного импульса 3 нс и среднеквадратичном разбросе времени задержки импульсов в формирователях 100–150 пс выходная средняя амплитуда импульса уменьшается на 5–10%, что является приемлемым при создании мощных источников с.ш.п.-излучения. Такую стабильность срабатывания двухэлектродного разрядника высокого давления можно получить при высокой скорости нарастания напряжения на электродах. Так, в предыдущих исследованиях [7]

была продемонстрирована работа двухэлектродного разрядника со среднеквадратичным разбросом времени срабатывания 100 пс при нарастании напряжения до 350 кВ за время 3 нс на электродах с зазором 0.7 мм в среде азота под давлением 90 атм.

В данной работе для получения высокой скорости нарастания напряжения на электродах разрядников мы использовали промежуточную ступень обострения, включенную между генератором монополярных импульсов и блоком из четырех формирователей и состоящую из линии и двухэлектродного разрядника. Электрическая длина промежуточной линии выбиралась такой, чтобы обеспечить возможность синхронизации биполярных импульсов по времени перехода напряжения через нуль или задержки этого момента в одних формирователях относительно других путем регулировки давления в разрядниках. Первый режим важен для получения максимальной амплитуды эффективного потенциала излучения, второй режим интересен тем, что появляется возможность сканирования волновым пучком.

Данная схема с.ш.п.-источника позволяет расширить спектр мощного излучения за счет синтеза импульса в дальней зоне при сложении электромагнитных импульсов с различающимися полосами частот [8]. В этом случае решетка разбивается на подрешетки, а длительности биполярных импульсов в формирователях, соответствующих различным подрешеткам, должны различаться. Простые численные расчеты показали, что стабильность синтезированного импульса выше, когда биполярные импульсы напряжения различной длительности синхронизируются по времени, соответствующему переходу через нуль при смене полярности.

Целью работы является проверка возможности реализации с.ш.п.-источника по предлагаемой схеме при длительности биполярного импульса 3 нс и применения этого источника для сканирования волновым пучком.

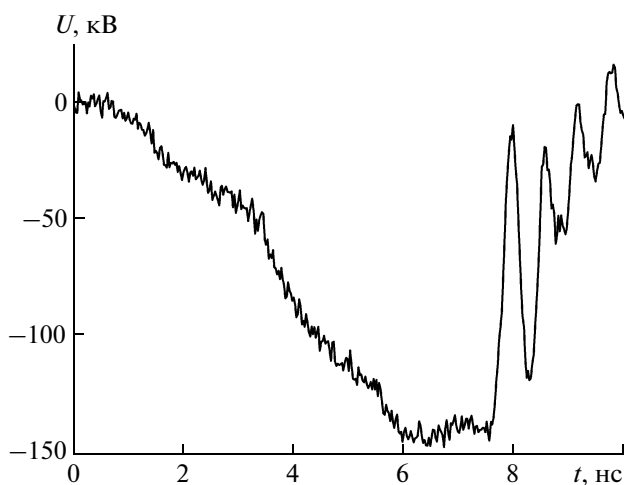


Рис. 3. Осциллограмма зарядного напряжения на промежуточной линии FL_2 с делителя D_1 .

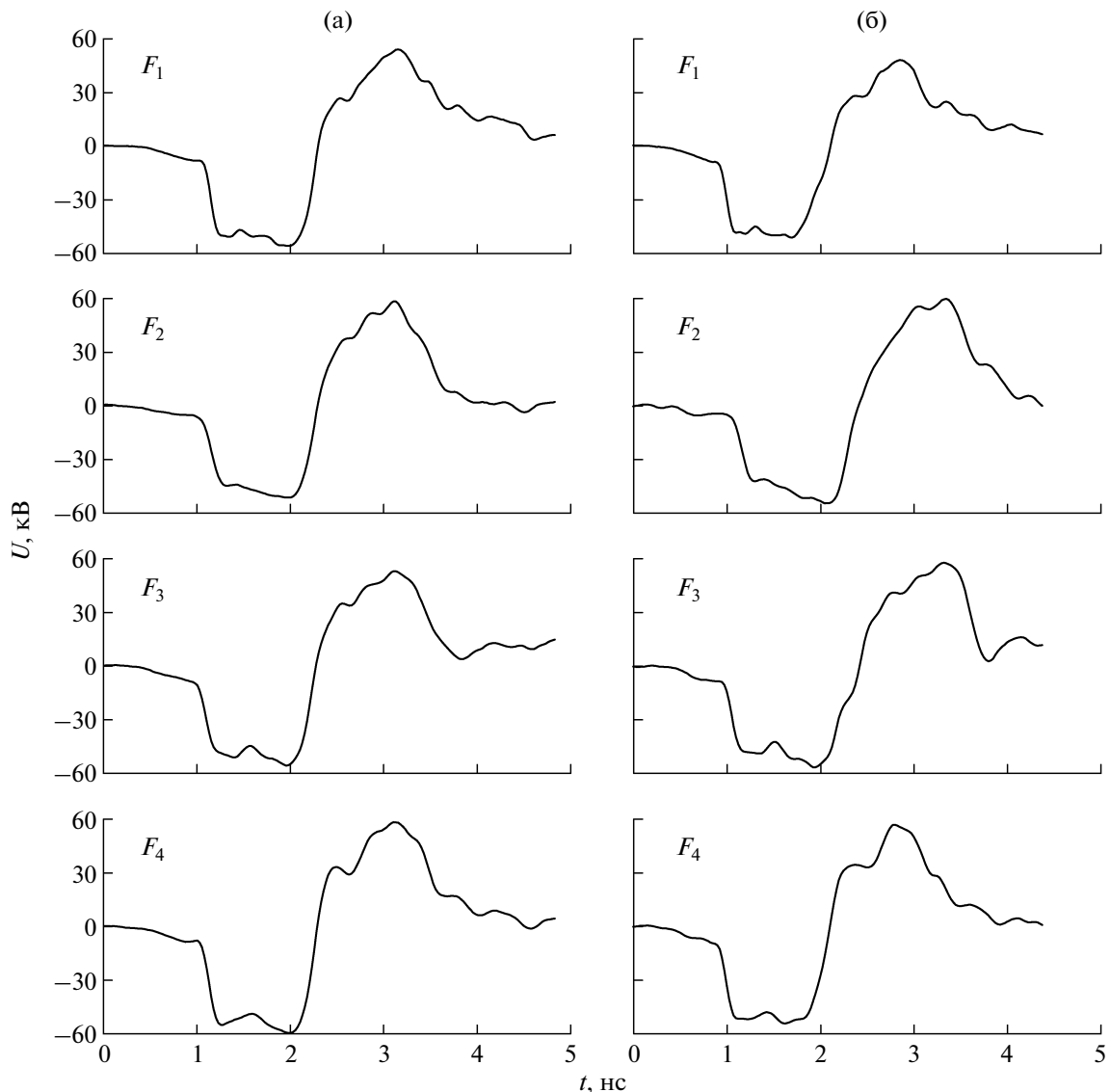


Рис. 4. Выходные биполярные импульсы в формирователях F_1 – F_4 , полученные с делителей D_{31} – D_{34} соответственно, для режимов: **а** – все импульсы синхронизованы по времени перехода напряжения через нуль; **б** – импульсы в формирователях F_2 и F_3 задержаны по моменту перехода напряжения через нуль относительно импульсов в F_1 и F_4 на время $\Delta t = 300$ пс.

КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Источник состоит из генератора монополярных импульсов СИНУС-160, четырех формирователей биполярных импульсов и 4-элементной антенной решетки, элементы которой возбуждаются напрямую от формирователей. Импульсы от каждого формирователя к элементам решетки подводятся с помощью коаксиальных линий и кабеля РК50-17-51 с кордельной изоляцией. Для повышения электрической прочности в кабели закачивался элегаз (SF_6) под давлением 4 атм. Измерение характеристик излучения проводилось в безэховой камере.

ГЕНЕРАТОР БИПОЛЯРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Генератор биполярных импульсов источника состоит из генератора высоковольтных монополярных импульсов СИНУС-160 [9], промежуточной ступени обострения и блока из четырех формирователей биполярных импульсов. На принципиальной схеме генератора биполярных импульсов напряжения (рис. 1) генератор СИНУС-160 представлен выходной формирующей линией FL_0 и разрядником S_0 . Выходная формирующая линия FL_0 заряжается от вторичной обмотки трансформатора Тесла до напряжения -360 кВ с частотой следования импульсов 100 Гц и коммутируется разрядником S_0 через высокоомную линию FL_1 и ограни-

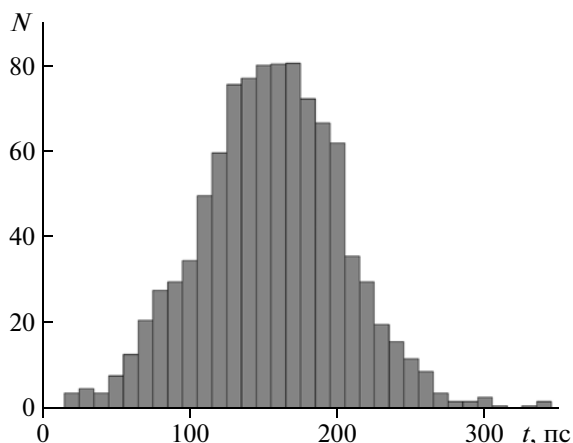


Рис. 5. Гистограмма разброса временного интервала, измеренного от точки запуска осциллографа отрицательным фронтом импульса формирователя F_1 до точки перехода напряжения через нуль формирователя F_2 .

чительное сопротивление R_0 на промежуточную линию FL_2 .

Разрядник S_1 срабатывает при напряжении, близком к максимальному, и подключает линию FL_2 через распределительную линию FL_3 к линиям $FL_{41}-FL_{44}$ формирователей биполярных импульсов F_1-F_4 . Все формирователи выполнены по схеме с разомкнутыми линиями $FL_{61}-FL_{64}$. При срабатывании обостряющих разрядников $S_{21}-S_{24}$ при напряжениях, близких к максимальным, а срезающих разрядников $S_{31}-S_{34}$ — с относительной задержкой, равной времени двойного пробега по линиям $FL_{51}-FL_{54}$, в передающих линиях $FL_{71}-FL_{74}$, в конце которых установлены нагрузки R_1-R_4 50 Ом, формируются биполярные импульсы напряжения длительностью 3 нс.

Конструкция промежуточной ступени обострения и блока формирователей биполярных импульсов (рис. 2) состоит из шести газовых объемов, разделенных капролоновыми изоляторами 1 и 2. В первом объеме в среде азота под давлением 28–36 атм размещены линии FL_1-FL_3 , разрядник S_1 и емкостный делитель зарядного напряжения D_1 . В четырех идентичных независимых объемах, ограниченных изоляторами 1 и 2, в среде азота под давлениями 25–35 атм расположены линии $FL_{41}-FL_{44}$, $FL_{51}-FL_{54}$, $FL_{61}-FL_{64}$, разрядники $S_{21}-S_{24}$, $S_{31}-S_{34}$ и емкостные делители зарядного напряжения $D_{21}-D_{24}$. Идентичные по конструкции четыре передающие линии $FL_{71}-FL_{74}$ со встроенными делителями напряжения на связанных линиях $D_{31}-D_{34}$ и нагрузки R_1-R_4 имеют элегазовую изоляцию под давлением 2 атм. Давления в указанных объемах могут независимо регулироваться.

Внутренние диаметры линий FL_2 , $FL_{41}-FL_{44}$, $FL_{51}-FL_{54}$, $FL_{61}-FL_{64}$ и $FL_{71}-FL_{74}$ равны 70, 16.4,

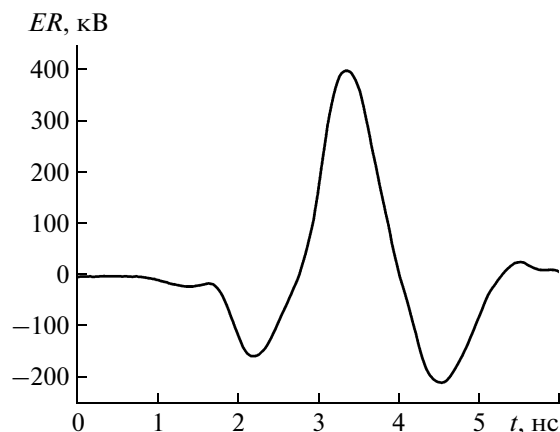


Рис. 6. Осциллограмма излученного импульса.

16.4, 7 и 7 мм соответственно. Electroдами кольцевых обостряющих разрядников S_1 и $S_{21}-S_{24}$ являются концы внутренних проводников линий FL_2 , FL_3 , $FL_{41}-FL_{44}$, $FL_{51}-FL_{54}$ соответственно. Межэлектродные зазоры в разрядниках S_1 и $S_{21}-S_{24}$ равны 1.4 и 0.6 мм соответственно. Electroдами срезающих разрядников $S_{31}-S_{34}$ служат диски 3 толщиной 2 мм и цилиндрические вставки, установленные на наружных проводниках линий $FL_{51}-FL_{54}$ с зазорами 0.5 мм. Материал электродов разрядников — медь.

Искровые каналы коммутации в разряднике S_1 от выстрела к выстрелу смещаются по электродам с диаметром 70 мм, что может приводить к неравномерной зарядке формирующих линий $FL_{41}-FL_{44}$

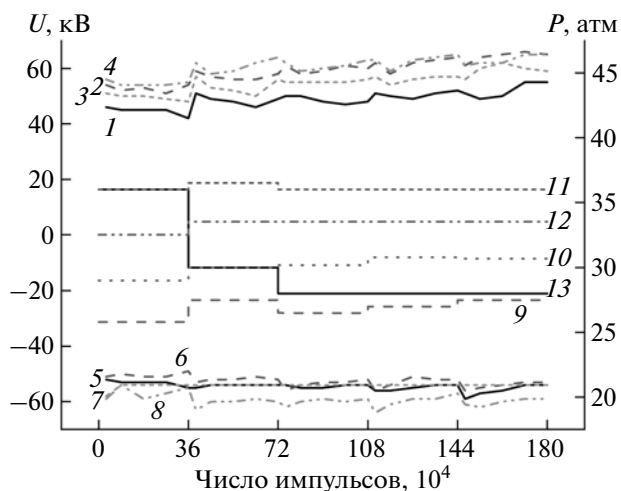


Рис. 7. Зависимости от числа импульсов отрицательной (1–4) и положительной (5–8) амплитуд биполярных импульсов напряжения для формирователей: F_1 (1, 5), F_2 (2, 6), F_3 (3, 7), F_4 (4, 8), а также изменения давления в формирователях F_1 (9), F_2 (10), F_3 (11), F_4 (12) и в разряднике S_1 (13).

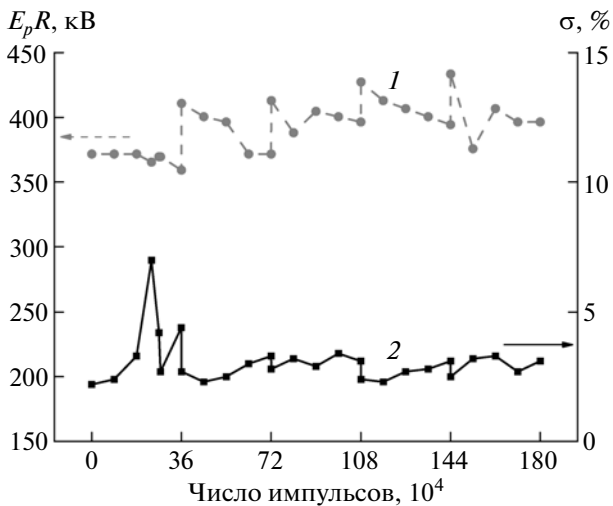


Рис. 8. Зависимости эффективного потенциала излучения (1) и его среднеквадратичного отклонения (2) от числа импульсов.

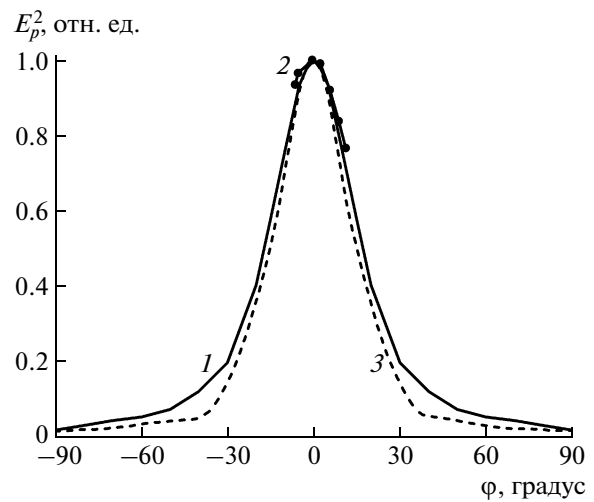


Рис. 9. Диаграммы направленности решетки 2 × 2: 1, 2 – измеренные соответственно при низком и высоком напряжениях; 3 – расчетная.

и, как следствие, к нестабильной работе формирователей F_1-F_4 . Для уменьшения этой неравномерности в цепь зарядки включена линия FL_3 , имеющая центральный проводник с суживающимся с 70 до 24 мм диаметром. Волновое сопротивление линии изменяется от 6.25 до 12.5 Ом. Оси четырех формирователей расположены в диаметрально противоположных точках на окружности с диаметром 53 мм. Импульс зарядного напряжения поступает от генератора СИНУС-160 по линии FL_1 , а биполярные импульсы после срабатывания разрядников $S_{21}-S_{24}$ и $S_{31}-S_{34}$ передаются по четырем линиям $FL_{71}-FL_{74}$ с волновым сопротивлением 50 Ом каждая в согласованные резистивные нагрузки либо в передающие антенны.

Для регистрации выходных биполярных импульсов с делителей напряжения $D_{31}-D_{34}$ использовался осциллограф LeCroy WaveMaster 830Zi с полосой до 30 ГГц, а для регистрации зарядных напряжений на линиях FL_2 и $FL_{41}-FL_{44}$ с емкостных делителей D_1 и $D_{21}-D_{24}$ соответственно осциллограф TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц. Делители D_1 и $D_{31}-D_{34}$ калиброваны, а делители $D_{21}-D_{24}$ не калибровались и использовались только для оценки времени зарядки линий $FL_{41}-FL_{44}$.

Осциллограмма зарядного напряжения на промежуточной линии FL_2 , полученная с делителя D_1 , приведена на рис. 3. Разрядник S_1 пробивался с задержкой 6.9 нс при напряжении 145 кВ. Подбором зазоров с точностью 0.05 мм в обостряющих $S_{21}-S_{24}$ и срезающих $S_{31}-S_{34}$ разрядниках добивались симметричных форм биполярных импульсов напряжения в формирователях F_1-F_4 . Изменяя время задержки пробоя разрядников $S_{21}-S_{24}$

в диапазоне от 0.5 до 0.9 нс путем регулирования давления в формирователях в пределах 25–35 атм, можно синхронизировать биполярные импульсы по времени перехода напряжения через нуль или сдвигать эти моменты переходов в одних формирователях относительно других на время Δt до 300 пс.

На рис. 4 приведены выходные биполярные импульсы, полученные с делителей $D_{31}-D_{34}$, для следующих режимов: все импульсы в формирователях синхронизированы по времени перехода напряжения через нуль (рис. 4а); импульсы в формирователях F_2 и F_3 задержаны по времени перехода напряжения через нуль относительно аналогичных моментов времени в F_1 и F_4 на время $\Delta t = 300$ пс (рис. 4б). Импульсы имеют амплитуды $\pm(50-60)$ кВ, длительность 3 нс при частоте следования 100 Гц. Наблюдаемые предимпульсы связаны с прохождением зарядных импульсов формирующих линий $FL_{41}-FL_{44}$ в нагрузку через проходные емкости соответствующих разрядников $S_{21}-S_{24}$.

При разбросе амплитуды зарядного напряжения генератора СИНУС-160 относительно средней менее 1% относительный разброс амплитуд биполярных импульсов напряжения не превышал 4–5%. При $\Delta t > 300$ пс нестабильность выходных биполярных импульсов увеличивалась, а их форма искажалась. Стабильность выходных импульсов формирователей относительно друг друга оценивалась измерением разброса временного интервала t_1 (hold off time) от точки запуска осциллографа отрицательным фронтом импульса одного формирователя до точки перехода напряжения через нуль другого формирователя.

На гистограмме разброса временного интервала t_1 , представленной на рис. 5, где N – число им-

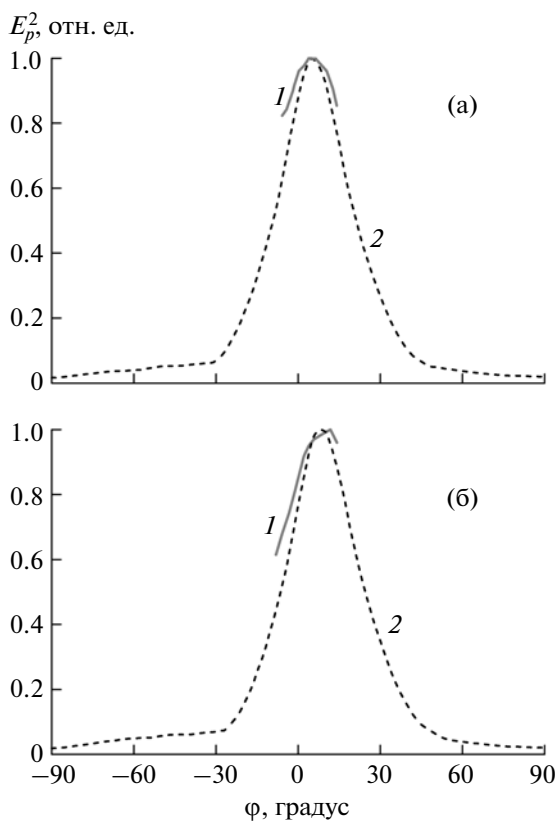


Рис. 10. Экспериментальная (1) и расчетная (2) диаграммы направленности решетки 2×2 с задержкой возбуждения двух элементов на 200 пс (а) и 300 пс (б).

пульсов, среднеквадратичное отклонение составляет 50–70 пс. За импульс в промежуточную линию передается 53%, а в нагрузку — 14% от накопленной энергии 3.2 Дж в формирующей линии FL_0 .

ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В излучающей системе, в отличие от использованной в [6], отсутствует четырехканальный делитель мощности, поскольку элементы решетки соединялись напрямую с формирователями биполярных импульсов. Для регистрации электромагнитного излучения использовалась *ТЕМ*-антенна с размерами земляной пластины 120×20 см, длиной рупора 90 см и апертурой 10×2 см [10], а также осциллограф Tektronix TDS 6604 с полосой пропускания до 6 ГГц. Осциллограмма излученного импульса (ER) в дальней зоне приведена на рис. 6.

Исследования источника с.ш.п.-излучения на ресурс проводились в следующем режиме: 1 ч работы и перерыв в течение 2 ч на охлаждение трансформатора Тесла. Суммарное время наработки источника при частоте повторения 100 Гц

составило >5 ч без смены электродов. В конце первого часа работы стабильность выходных импульсов нарушалась из-за того, что точка, соответствующая времени пробоя разрядника S_1 , смещалась за максимум зарядного напряжения.

Это связано с тем, что в результате эрозии увеличился межэлектродный зазор в разряднике, кроме того, к концу часа работы давление в объеме разрядника возросло из-за нагрева газа. Подсоединение дополнительного балластного газового объема 3 л к объему разрядника S_1 и снижение давления в пределах 2 атм через каждый час работы позволили стабилизировать работу генератора биполярных импульсов напряжения. На рис. 7 представлены зависимости амплитуд биполярных импульсов напряжения для каналов F_1 – F_4 от числа импульсов.

В эксперименте одновременно измерялись зависимости амплитуд положительной и отрицательной полуволн биполярных импульсов напряжения (рис. 7, кривые 1–8), а также амплитуды электромагнитного импульса (E_pR) и ее среднеквадратичного отклонения (σ) от числа импульсов (рис. 8). На рис. 7 показано также изменение давления P в разрядниках промежуточной ступени обострения (кривая 13) и формирователей (кривые 9–12) в зависимости от числа импульсов. Во всех измерениях усреднение проводилось по 100 импульсам.

Средняя величина E_pR за 5 ч работы составила 400 кВ при среднем значении среднеквадратичного отклонения $\sigma = 3\%$. Эффективность по пиковой напряженности поля источника с.ш.п.-излучения, определяемая как отношение эффективного потенциала излучения к амплитуде импульса напряжения на входе системы, составила 6.6.

Использование четырех независимых формирователей позволило исследовать отклонение максимума волнового пучка от нормали к решетке. Для этого у двух формирователей, возбуждающих вертикальную линейку антенн, время перехода напряжения через нуль сдвигалось на 200 или 300 пс относительно двух других формирователей. К сожалению, размеры безэховой камеры позволяли измерять фрагмент диаграммы направленности шириной $\leq 20^\circ$.

Кроме того, была разработана программа для расчета диаграммы направленности решетки, моделирующая сложение импульсов излучения с учетом их формы, а также диаграммы направленности элементов и задержек возбуждения элементов в решетке. На рис. 9 приведены диаграммы направленности решетки с синхронным возбуждением элементов. Диаграмма направленности при низком напряжении и методика ее измерения были приведены в [6]. Видно, что и расчетная, и экспериментальные диаграммы направленности хорошо согласуются.

На рис. 10а приведены экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) диаграммы направленности решетки с задержкой возбуждения двух элементов на 200 пс. Согласно рисунку, максимумы обеих диаграмм согласуются, угол отклонения равен 5.5° . Однако при задержке возбуждения двух элементов на 300 пс (рис. 10б) положение максимумов экспериментальной (кривая 1, 12°) и расчетной (кривая 2, 8°) диаграмм направленности различается. Возможно, это связано с изменением длительности первого полупериода импульса напряжения (рис. 4б), что не учитывается в расчетах.

ВЫВОДЫ

Разработанный источник с.ш.п.-излучения на основе четырехэлементной решетки комбинированных антенн, возбуждаемых четырьмя генераторами биполярных импульсов со средним значением амплитуды 50–60 кВ и длительностью 3 нс, позволяет получать импульсы излучения с эффективным потенциалом 400 кВ при частоте повторения 100 Гц. Ресурс работы источника без смены электродов разрядников формиратора составляет ≥ 5 ч. При этом изменение эффективного потенциала излучения при синхронном возбуждении не превышает 20%, а нестабильность – 3%.

Продемонстрирована возможность синхронизации биполярных импульсов формираторов со среднеквадратичным разбросом < 100 пс по времени перехода напряжения через нуль или задержки момента этого перехода в одних формираторах относительно аналогичного момента в других на время до 300 пс путем регулировки давления в двухэлектродных разрядниках. Это позволило отклонить максимум волнового пучка до 12° от нормали к решетке.

Авторы благодарят К.Н. Сухушина за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц и генерация электромагнитного излучения в системах большой мощности”, проект “Исследования эффективных механизмов генерации сверхмощных электромагнитных импульсов наносекундной длительности и их взаимодействия с веществом”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов В.П., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2005. № 3. С. 46.
2. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // РЭ. 2007. Т. 52. № 7. С. 813.
3. Koshelev V.I., Efremov A.M., Kovalchuk B.M. et al. // Proc. 15 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 21–26. 2008. P. 383.
4. Ефремов А.М., Кошелев В.И., Ковальчук Б.М. и др. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 77.
5. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // РЭ. 2011. Т. 56. № 12. С. 1457.
6. Андреев Ю.А., Ефремов А.М., Кошелев В.И. и др. // ПТЭ. 2011. № 6. С. 51.
7. Koshelev V.I., Andreev Yu.A., Efremov A.M. et al. // Proc. 16 Inter. Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk: Institute of High Current Electronics SB RAS, September 19–24. 2010. P. 415.
8. Andreev Yu.A., Buyanov Yu.I., Koshelev V.I. et al. // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 4. N.Y.: Plenum Press, 1999. P. 181.
9. Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. №. 2. P. 211.
10. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Плиско В.В. // Доклады V Всероссийской научно-технической конференции “Радиолокация и радиосвязь”. М.: Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2011. С. 77.