

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.373.54

ГЕНЕРАТОР СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ С ФОРМИРОВАТЕЛЕМ РЕЗКОГО СПАДА

© 2020 г. А. М. Бобрешов^а, *, А. С. Жабин^а, В. А. Степкин^а, Г. К. Усков^а^аВоронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж, 394036 Российская Федерация

*E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Поступила в редакцию 12.11.2019 г.

После доработки 04.03.2020 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

Проанализирована работа генератора сверхкоротких импульсов на базе индуктивного накопителя энергии и полупроводникового размыкателя тока — диода с накоплением заряда. Для достижения максимальной амплитуды формируемых импульсов проведена оптимизация параметров схемы генератора и режима его работы. Для уменьшения их длительности предложено применение формирователя резкого спада на основе диодов с накоплением заряда. Приведены результаты экспериментального исследования предложенных решений, за счет которых удалось получить длительность импульса 230 пс по полувывоте при амплитуде 70 В.

DOI: 10.31857/S0033849420100010

ВВЕДЕНИЕ

Сверхкороткие импульсные сигналы (СКИ) нашли применение в различных приложениях радиопроизводства и электроники, например, подповерхностной и ближней радиолокации [1], микроволновом зрении [2] и беспроводной сверхширокополосной связи. Известно, что характеристики таких систем зависят от амплитуды, длительности, спектрального состава и частоты следования используемых импульсов [1]. Так, разрешающая способность радиолокационной станции тем выше, чем меньше пространственная длительность импульсного сигнала [1], а увеличение его амплитуды повышает дальность действия радиосистемы.

Основным принципом формирования таких сигналов является относительно длительное накопление энергии в реактивном элементе, а затем ее быстрая передача в нагрузку в виде импульса напряжения или тока. В данной статье рассмотрены формирователи видеопульсов, построенные на основе индуктивных накопителей энергии и диодов с накоплением заряда (ДНЗ), которые выполняют роль размыкателей тока благодаря сверхбыстрому изменению своей проводимости.

Цель работы — решить ряд задач, связанных с оптимизацией параметров схемы и режимов работы генератора, что обеспечивается выбором используемой элементной базы и разработкой новых схемотехнических решений, позволяющих

уменьшить длительность формируемых СКИ при их максимально возможной амплитуде.

1. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ И СХЕМА ГЕНЕРАТОРА СКИ

На данный момент известно достаточно большое количество схемотехнических решений генераторов СКИ [3–11]. Одна из простейших схем генератора, реализующая принцип накопления энергии магнитного поля в индуктивности с последующей ее быстрой передачей в нагрузку, представлена на рис. 1. Работа указанного генератора с индуктивным накопителем энергии подробно рассмотрена ранее [3]. Процесс формирования импульса условно разделяют на три стадии, которые ограничены моментами времени t_0 , t_1 и t_3 , представленными на временной диаграмме тока через нагрузку (рис. 2в). На первой стадии ($t < t_0$) напряжение $V_{\text{зап}}$ на базе транзистора VT равно нулю (рис. 2а). Транзистор закрыт, диод с накоплением заряда VD смещен в прямом направлении, а протекание через него тока I_{VD} (рис. 2б) сопровождается инжекцией электронов и дырок в активную область и накоплением в ней носителей заряда. На второй стадии транзистор VT открывается подаваемым на его затвор запускающим импульсом, смещение на диоде VD изменяется на обратное, вследствие чего происходит удаление накопленного заряда из полупроводниковой структуры диода.

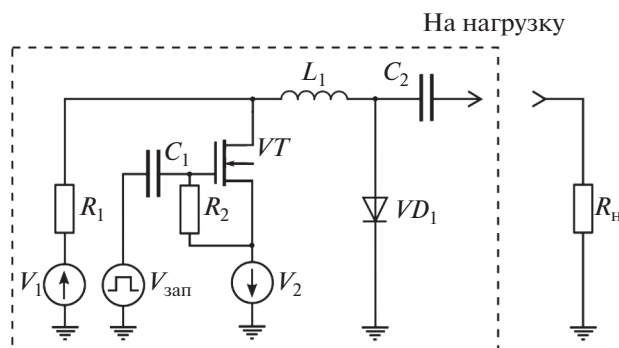


Рис. 1. Схема генератора СКИ.

да. Одновременно с этим ток через индуктивность L_1 также меняет свое направление и в ней накапливается энергия магнитного поля. Эта стадия начинается в момент времени t_0 и заканчивается в момент времени t_1 , когда концентрация накопленных носителей заряда в активной области диода становится близкой к нулю. В течение третьей — завершающей стадии ($t_1 < t < t_3$) — происходит резкое восстановление высокого обратного сопротивления диода и формирование импульса на нагрузке.

Как показано в работе [3], генерируемый сверхкороткий импульсный сигнал с достаточной степенью точности можно рассматривать как суперпозицию двух экспоненциальных функций. Первая из них описывает процесс переключения ДНЗ в закрытое состояние и характеризует передний фронт формируемого импульса, вторая — переходные процессы в реактивных элементах генератора и, соответственно, спад СКИ. Очевидно, что от длительностей фронта и спада зависит длительность результирующего импульса. Амплитуда СКИ определяется величиной тока через диод на момент окончания экстракции носителей заряда, временем его переключения в закрытое состояние и длительностью переходных процессов в реактивных элементах схемы. Причем при прочих равных условиях, увеличивая индуктивность, можно добиться повышения амплитуды, но в то же время это приведет к росту длительности спада формируемого импульса. Отсюда можно сделать вывод, что для рассматриваемой схемы генератора невозможно одновременное достижение максимальной амплитуды и минимально возможной длительности СКИ. Поэтому в данной работе предложено произвести оптимизацию элементов схемы для достижения максимальной амплитуды, а длительность формируемых импульсов уменьшить дополнительным схемотехническим решением — формирователем резкого спада.

2. УВЕЛИЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ФОРМИРУЕМЫХ СКИ

Для достижения максимума амплитуды должны быть выполнены следующие условия: величина тока, протекающего через ДНЗ на второй стадии работы генератора, должна быть максимальной для используемого типа ДНЗ; время переключения ДНЗ — минимально возможным; величина энергии, накопленной в индуктивности к моменту переключения диода, — максимально достижимой.

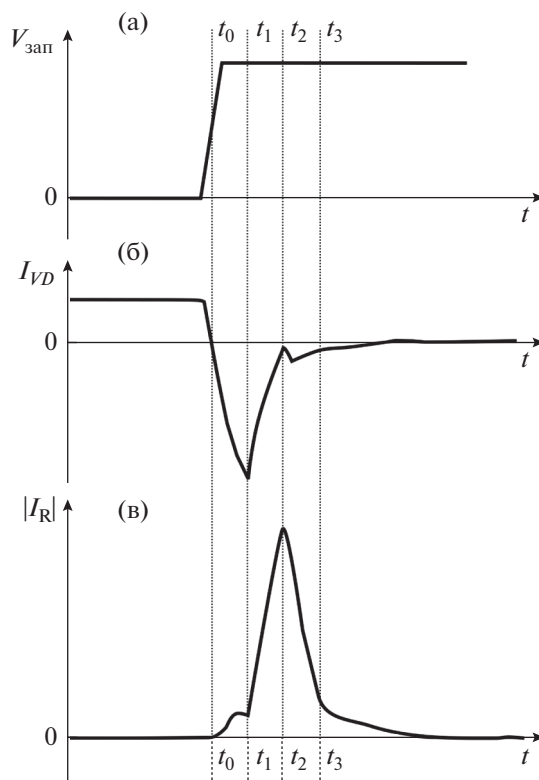


Рис. 2. Временные диаграммы токов и напряжений в схеме генератора; а–в — три условные стадии (см. текст).

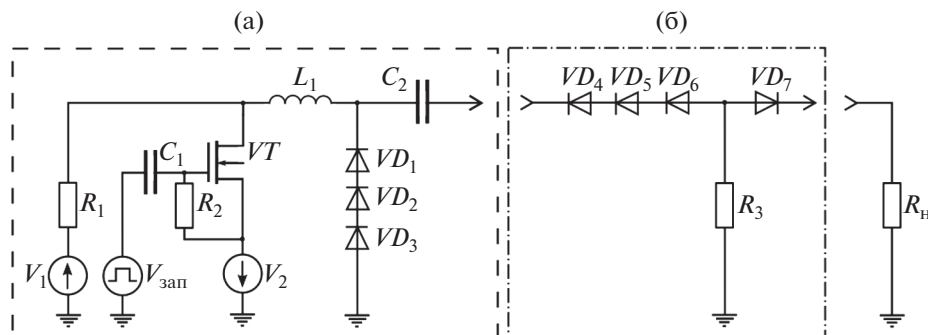


Рис. 3. Схема генератора СКИ (а) с формирователем резкого спада (б).

Выполнения первых двух условий можно добиться, осуществляя подбор диода с накоплением заряда и задавая режим его работы для соответствия конкретным требованиям, предъявляемым к разрабатываемому генератору СКИ. Кроме того, существует подход [4], при котором вместо одного устанавливают несколько последовательно соединенных ДНЗ. За счет этого можно добиться уменьшения их результирующего времени переключения в закрытое состояние.

Последнее условие, необходимое для достижения максимума амплитуды СКИ, означает выбор максимально возможного номинала индуктивности при заданном значении протекающего тока. Однако существуют ограничения, связанные с переходными процессами на первой и второй стадиях работы генератора. При неверно выбранных значениях индуктивности прямой и/или обратный токи, могут не достичь своих максимально возможных значений к моменту переключения ДНЗ, что негативно скажется на параметрах формируемых импульсов. Как видно из схемы (см. рис. 1) для увеличения тока I_L на второй стадии рабочего цикла генератора следует повышать напряжение источника питания V_2 . Однако оно не должно превышать напряжение пробоя диода. После открытия транзисторного ключа VT ток через индуктивность I_L экспоненциально возрастает, асимптотически стремясь к своему максимальному значению, равному $V_2/(R_D + R_{VT})$, где R_D — активное сопротивление диода в проводящем состоянии, а R_{VT} — сопротивление канала полевого транзистора при отпирающем напряжении на затворе.

Скорость нарастания тока I_L определяется величиной индуктивности L_1 и суммарным сопротивлением цепи $VD-L_1-VT$, а момент переключения диода — зарядом Q , накопленным в его активной области в течение первой стадии. То есть чем больше накоплено заряда, тем дольше диод находится в проводящем состоянии и тем ближе значение

обратного тока к максимально достижимому. Накопление заряда на первой стадии работы генератора зависит от ее длительности, переходного процесса в индуктивности, напряжения источника V_1 , определяющего прямой ток диода, и времени жизни неосновных носителей заряда в активной области ДНЗ.

Таким образом, поиск решения для обеспечения максимальной амплитуды формируемого сигнала представляет собой задачу многопараметрической оптимизации параметров схемы генератора. При этом для ее решения необходимо реализовать возможность управления длительностью стадии накопления заряда в ДНЗ, что одновременно позволит добиться более высокой частоты повторения импульсов. В соответствии со сказанным, было предложено изменить описанную выше схему (рис. 3а).

Для уменьшения времени переключения в анализируемых далее схемах генератора были установлены по три последовательно соединенных диода MAVN-044769 вместо одного. Указанное количество ДНЗ было определено экспериментально.

В модифицированной схеме (см. рис. 3а) предложено изменить направление включения диодов с накоплением заряда VD_{1-3} . В этом случае, пока транзистор VT закрыт, диоды VD_{1-3} смещены в обратном направлении и вследствие наличия разделительной емкости C_2 потребления тока не происходит. При подаче запускающего импульса $V_{зап}$ транзистор VT открывается, источник V_2 смещает диоды VD_{1-3} в прямом направлении и происходит накопление заряда в их полупроводниковой структуре. После завершения запускающего импульса транзистор закрывается, диоды VD_{1-3} смещаются в обратном направлении, что приводит к удалению накопленного заряда, а затем к переключению ДНЗ в непроводящее состояние и формированию СКИ на нагрузке R_H . Указанные изменения позволяют регулировать длительность

первой стадии работы генератора, что дает возможность управлять количеством накопленного заряда, а следовательно, и моментом переключения диодов VD_{1-3} .

Для нахождения номиналов элементов схемы, при которых достигается максимальное значение напряжения импульса на нагрузке (максимум амплитуды), была проведена оптимизация предложенной схемы генератора. В ходе оптимизации варьировались следующие величины: напряжение источника V_2 , индуктивность L_1 , емкость C_2 , сопротивление R_1 , длительность запускающего импульса $\tau_{\text{зап}}$. При этом исходя из предельно допустимых режимов работы ДНЗ (MAVR-044769) и транзистора (RD15HVF1) напряжение V_1 не должно превышать 30 В, а напряжение источника V_2 – 15 В. Максимальное значение длительности запускающего импульса выбиралось равным величине времени жизни носителей заряда, приведенной в документации на диод, и составляло 50 нс. Накопление заряда в течение более длительного интервала времени не приведет к его увеличению из-за процессов рекомбинации. Параметры модели ДНЗ [6] определялись с помощью экспериментально измеренных переходных характеристик по методике, описанной в работе [12]. Поиск оптимальных значений номиналов схемы генератора проводили с использованием метода Монте-Карло и метода градиента. В результате оптимизации были получены значения параметров схемы ($V_1 = 30$ В, $V_2 = 14.7$ В; $L_1 = 17$ нГ; $C_1 = 10$ нФ; $C_2 = 40$ пФ; $R_1 = 10$ Ом; $R_2 = 50$ Ом; $\tau_{\text{зап}} = 23$ нс), при которых амплитуда генерируемого сверхкороткого импульса на нагрузке $R_n = 50$ Ом составила 74 В.

Необходимо отметить, что увеличение емкости C_2 относительно указанного выше значения, практически не влияет на амплитуду и длительность фронта формируемого импульса. Кроме того, при оптимизации указанных выше параметров не предъявлялось требований к значению длительности СКИ, которое на полувысоте составило $\tau_{\text{имп}} = 0.65$ нс. Причем длительность фронта формируемого импульса, обусловленная временем переключения ДНЗ, равна 160 пс и практически не зависит от номиналов схемы, в то время как длительность спада составляет много большую величину, 1260 пс, и определяется переходными процессами в реактивных элементах. Схемотехническое решение, предложенное для уменьшения длительности спада СКИ, описано в следующем разделе.

3. УМЕНЬШЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФОРМИРУЕМЫХ СКИ

Как упоминалось, длительность формируемых импульсов определяется фронтом и спадом, которые в свою очередь связаны с разными процессами, протекающими в схеме генерации. Длительность фронта зависит от времени переключения ДНЗ и составляет порядка сотни пикосекунд, а спад импульса – в большей степени от номиналов реактивных элементов схемы. Нами предложено схемотехническое решение, позволяющее существенно уменьшить длительность спада СКИ на выходе генератора.

Схема генератора импульсов, включающая формирователь резкого спада на основе диодов с накоплением заряда VD_{4-6} , представлена на рис. 3. Длительность запускающего импульса, номиналы индуктивности L_1 , емкости C_2 , сопротивления R_1 и значения напряжений V_1 и V_2 были выбраны в соответствии с результатами проведенной ранее оптимизации с целью обеспечения максимальной амплитуды СКИ.

Первая стадия работы генератора (см. рис. 3а) с формирователем резкого спада (см. рис. 3б) аналогична описанной в разд. 2. Однако необходимо отметить, что на этой стадии накопление заряда происходит не только в полупроводниковых структурах диодов VD_{1-3} , но и в VD_{4-6} за счет тока, протекающего через них и резистор R_3 , вследствие перезарядки емкости C_2 . Величина накопленного в VD_{4-6} заряда определяется номиналами указанных элементов. На этой стадии диод Шоттки VD_7 препятствует протеканию тока через нагрузку, тем самым позволяя избавиться от нежелательного выброса напряжения отрицательной полярности на нагрузке, который предшествует формированию СКИ (рис. 4).

После завершения импульса запуска транзистор VT закрывается и диоды VD_{1-3} смещаются в обратном направлении. Благодаря накопленному заряду, их обратное сопротивление на данной стадии работы представляет собой малую величину (единицы ом), поэтому можно считать, что они полностью шунтируют часть цепи, включающую конденсатор C_2 , а ток в этой цепи пренебрежимо мал. Обратный ток через диоды VD_{1-3} сопровождается экстракцией накопленного заряда. Как только весь накопленный заряд покидает их полупроводниковую структуру, сразу же стремительно восстанавливается их высокое обратное сопротивление. При этом происходит обрыв тока в цепи диодов VD_{1-3} и формируется фронт импульса, который способствует разрядке емкости C_2 , что обуславливает обратное смещение диодов VD_{4-6} и удаление заряда из их полупроводнико-

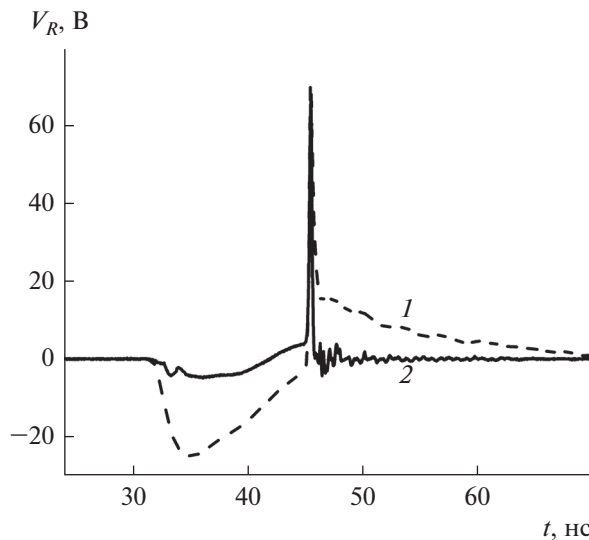


Рис. 4. Сверхкороткий импульсный сигнал, полученный с применением формирователя резкого спада (сплошная кривая) и без него (штриховая).

вых структур. Сверхбыстрое восстановление их высокого обратного сопротивления приводит к формированию резкого спада импульса на нагрузке R_n . Таким образом, длительность формируемых сверхкоротких импульсов значительно уменьшается.

Стоит отметить, что выбор номинала сопротивления R_3 следует осуществлять исходя из величины накопленного заряда в VD_{4-6} и условия $R_3 \gg R_n$, необходимого для исключения шунтирования нагрузки на последней стадии работы генератора. В данной работе оно составило 600 Ом.

В связи с тем что экстракция накопленного заряда в VD_{4-6} происходит под действием генерируемого сверхкороткого импульса, проходящего через формирователь резкого спада, величина этого заряда должна быть достаточной для достижения максимальной амплитуды формируемых импульсов. Стоит подчеркнуть, что накопление указанного заряда предложено осуществлять, используя не дополнительный источник питания, а положительное смещение, которое обеспечивается перезарядкой емкости C_2 . Как было сказано выше, в схеме генератора без формирователя резкого спада увеличение емкости C_2 относительно полученного при оптимизации значения не приводит к существенным изменениям параметров импульса. Тогда в схеме с формирователем резкого спада ее номинал можно подобрать так, чтобы восстановление высокого обратного сопротивления VD_{4-6} началось в момент времени t_2 (см. рис. 2), когда напряжение на нагрузке достигает максимума. Выполнение данного условия обеспечивает формирование на нагрузке импульса с наи-

меньшей длительностью при максимальной амплитуде. Дальнейшее увеличение C_2 позволяет варьировать в некоторых пределах длительность формируемых СКИ при неизменном значении максимального напряжения на нагрузке. Уменьшение указанной емкости приведет к уменьшению результирующей длительности импульсов, однако при этом будет наблюдаться и уменьшение их амплитуды. Для предложенной схемы генератора с учетом ее оптимизированных параметров значение C_2 было выбрано равным 50 пФ. При этом выходное напряжение импульса успевает достичь максимума (72 В), и переключение диодов VD_{4-6} начинается, когда напряжение на нагрузке достигает пикового значения. В результате оптимизации длительность переднего фронта импульса на выходе формирователя составила 130 пс, длительность спада 140 пс, а результирующая длительность формируемых импульсов на полувысоте – 180 пс.

4. ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА СКИ И УРОВЕНЬ ЗВОНА

Зачастую при использовании в радиолокационных системах и системах связи импульсных сигналов период следования значительно превышает их длительность. Передающая часть находится в ожидании в течение времени распространения сигнала до цели и обратно [2]. При этом генератор СКИ (см. рис. 1) продолжает потреблять энергию источника питания V_1 , так как при закрытом транзисторе VT ток протекает по цепи накачки ДНЗ. В отличие от большинства известных генераторов [3–5, 7–11] в предложенной схеме (см. рис. 3)

предусмотрена возможность регулирования продолжительности стадии накопления заряда диодов VD_{1-3} , за счет чего можно снизить потребление энергии.

Помимо этого, как видно из рис. 3, схема генератора не содержит источник для смещения диодов VD_{4-6} в прямом направлении. В похожих схемах генераторов, описанных, например, в [10, 11], такой постоянный источник использовался для регулировки прямого тока через диод в формирователе спада и величины накопленного в нем заряда. В предлагаемой схеме генератора смещение VD_{4-6} происходит благодаря перезарядке емкости C_2 , что позволяет отказаться от дополнительного источника питания. Данное схемотехническое решение дает возможность сократить потребление энергии, что может оказаться особенно важным для мобильных, портативных радиосистем.

При формировании СКИ важно минимизировать колебательный процесс, так называемый “звон”, возникающий после генерации импульса. Для корректной работы генератора и радиосистемы в целом формирование следующего импульса должно происходить после затухания звона от предыдущего. Данное условие ограничивает частоту повторения СКИ. Основной причиной звона являются переходные колебательные процессы в реактивных элементах схемы. Для уменьшения уровня этих колебаний используются различные решения, в том числе на основе быстродействующих диодов Шоттки [6]. В предложенном генераторе эту функцию выполняют диоды VD_{4-6} , использование которых позволило снизить уровень звона за счет блокирования положительных полуволн переходных колебаний и обеспечить их быстрое затухание.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Плата разработанного генератора была изготовлена из материала Rogers RO4350B. Ширина дорожек рассчитывалась для согласования с нагрузкой 50 Ом. Управление транзисторным ключом RD15HVF1 в схеме генератора осуществлялось запускающими импульсами от генератора импульсов Agilent 81104A с амплитудой 10 В и регулируемой длительностью от 6 нс. В качестве нагрузки R_n использовали вход стробоскопического осциллографа DCA-X 86100D с сопротивлением 50 Ом и полосой пропускания 20 ГГц, с помощью которого регистрировали осциллограммы и определяли параметры импульсного сигнала на выходе генератора. В качестве диодов с накоплением заряда использовали MAVR-044769.

Осциллограммы на выходе генератора без применения формирователя резкого спада и с его применением представлены на рис. 4. Номиналы элементов, режимы работы и длительность запускающих импульсов выбирали исходя из результатов проведенной оптимизации. Как видно из осциллограммы, применение дополнительного схемотехнического решения в схеме генератора на базе ДНЗ MAVN-044769 позволило сократить длительность спада формируемых СКИ до 150 пс, а результирующую длительность по полувысоте — до 230 пс при максимальной амплитуде, составляющей 70 В. Помимо этого, использование формирователя резкого спада позволило уменьшить уровень звона до -23.5 дБ. В сравнении с другими известными решениями [3–11], предлагаемый генератор позволяет формировать импульсы с большей амплитудой, меньшей длительностью и меньшим уровнем звона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ схемы генерации СКИ, основанной на накоплении энергии магнитного поля в индуктивности и ее быстрой передаче в нагрузку. Описаны закономерности изменения формы и параметров генерируемых импульсов в зависимости от характеристик переключения диода с накоплением заряда и переходных процессов в реактивных элементах схемы. Для схемы генератора с индуктивным накопителем предложен подход, позволяющий формировать СКИ максимальной амплитуды и при этом избежать увеличения их длительности за счет применения формирователя резкого спада. Помимо этого, предложенные схемотехнические решения позволили снизить уровень звона и энергопотребление генератора. Экспериментально полученный импульсный сигнал на выходе генератора обладает следующими параметрами: амплитуда 70 В, длительность 230 пс, уровень звона -23.5 дБ. Материалы работы могут использоваться при разработке сверхширокополосных радиолокационных систем высокого разрешения и систем сверхширокополосной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Ю.А., Кошелев В.И., Романченко И.В. и др. // РЭ. 2013. Т. 58. № 4. С. 337.
2. Pitcher A.D., McCombe J.J., Eveleigh E.A., Nikolova N.K. // 2018 IEEE/MTT-S Int. Microwave Symp. (IMS). Philadelphia. 10–15 Jun. N.Y.: IEEE, 2018. P. 919.
3. Бобришов А.М., Жабин А.С., Степкин В.А., Усков Г.К. // Радиотехника. 2016. № 2. С. 101.
4. Бобришов А.М., Жабин А.С., Степкин В.А., Усков Г.К. // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. 2016. № 3. С. 13.

5. *Yin Q., Pan Z., Zhang Z.* // Proc. 2nd Int. Conf. on Mechanical, Electronic, Control and Automation Engineering (MECAE 2018), Qingdao. 30–31 Mar. Hong Kong: Atlantis Press, 2018. P. 158.
6. *Bobreshov A.M., Zhabin A.S., Stepkin V.A., Uskov G.K.* // IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2017. V. 27. № 11. P. 1013.
7. *Oloumi D., Ting J.-W., Rambabu K.* // IEEE Trans. V. MTT-64. 2016. № 8. P. 2684.
8. *Moll J.L., Krakauer S., Shenii R.* // Proc. IRE. 1962. V. 50. № 1. P. 43.
9. *Kyhala J., Andersson M.* // Microwave J. 2005. V. 48. № 9. P. 206.
10. *Yongsheng G., Baiyu L., Yonglin B. et al.* // Chinese J. Electron. 2010. V. 19. № 2. P. 378.
11. *Fu Z., Liu J., Zhang Z.* // Proc. 2018 IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems (ISCAS), Florence. 27–30 May. N.Y.: IEEE, 2018. P. 8351347.
12. *Бобрешов А.М., Кутаев Ю.И., Степкин В.А., Усков Г.К.* // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика. Математика. 2012. № 2. С. 12.