

01.5;13.4

## Генерация темных импульсов огибающей в модифицированной схеме шумотрона

© С.В. Гришин, В.Н. Скороходов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

E-mail: sergrsh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2023 г.

В окончательной редакции 24 июня 2023 г.

Принято к публикации 26 июля 2023 г.

Получена генерация темных импульсов огибающей с длительностью  $\sim 10$  ns в модифицированной схеме шумотрона, состоящей из двух нелинейных усилителей: многорезонаторного пролетного клистрона и лампы бегущей волны, охваченных цепью запаздывающей обратной связи. Пролетный клистрон работает в режиме насыщения выходной мощности, а лампа бегущей волны в нелинейном крестатронном режиме, в котором на амплитудной характеристике лампы присутствуют два  $N$ -образных участка, а зависимость набега фазы от мощности сигнала на входе лампы бегущей волны является сильно нелинейной. Показано, что увеличение мощности хаотического сигнала в кольце приводит не только к уменьшению усредненного периода следования темных импульсов огибающей, но и к образованию связанных состояний темных и антитемных импульсов огибающей.

**Ключевые слова:** диссипативные солитоны, шумотрон, лампа бегущей волны, клистрон.

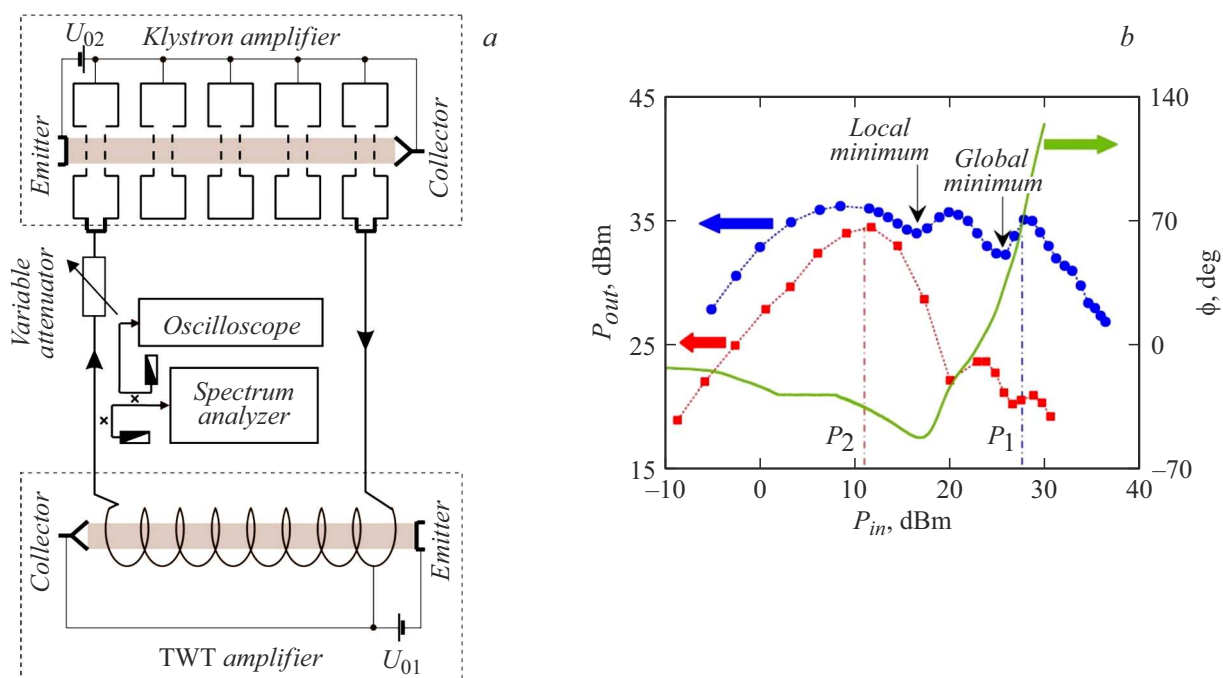
DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56176.19516

На данный момент одной из актуальных задач в области СВЧ-электроники является создание источников коротких и ультракоротких импульсов огибающей. Такие импульсы представляют интерес для исследования быстропротекающих процессов, для микрообработки различных материалов и биологических тканей [1], а их связанные состояния, например, в виде „светлых“ и „темных“ импульсов являются привлекательными для систем передачи информации, где они могут использоваться в качестве расширенных информационных битов [2]. В микроволновом диапазоне для генерации коротких импульсов огибающей применяются методы нелинейной оптики (пассивная синхронизация мод с насыщающимся поглотителем [3,4] или усилителем [5], пассивная синхронизация мод на керровской нелинейности [6,7], нелинейные параметрические процессы [8] и др.), которые позволяют получать нелинейные импульсы огибающей с длительностями от сотен пикосекунд [4,5] до единиц [8] и десятков наносекунд [3,6,7]. Среди нелинейных импульсов (диссипативных солитонов огибающей), формирующихся в средах/системах с усилением и диссипацией [9], различают светлые и темные импульсы огибающей. Первые формируются из шумов системы и характеризуются колоколообразной формой [3,4,6,8]. Вторые, напротив, формируются на амплитудном фоне в виде относительно узких „провалов“ [5,7]. В работе [5] для получения коротких темных импульсов огибающей субнаносекундной длительности было предложено использовать два нелинейных элемента в цепи обратной связи микроволнового активного кольцевого резонатора. Один из них (ферромагнитная пленка) поддерживал трехволновый параметрический распад дипольной по-

верхностной магнитостатической волны на обменные коротковолновые спиновые волны, приводящий к хаотизации сигнала в кольце, а другой (транзисторный усилитель), работая в режиме максимальной выходной мощности (режим насыщения), обеспечивал ограничение роста амплитуды хаотического сигнала.

Предложенный в работе [5] метод генерации хаотических темных импульсов огибающей короткой длительности можно реализовать и в генераторных схемах вакуумной СВЧ-электроники. Наиболее известным и, пожалуй, одним из первых генераторов хаоса является „шумотрон“ [10], состоящий из двух ламп бегущей волны (ЛБВ), охваченных цепью запаздывающей обратной связи. Одна из ЛБВ работает в режиме линейного усиления сигнала (линейный усилитель), а другая — на „падающем“ участке амплитудной характеристики и в условиях сильной фазовой нелинейности (нелинейный усилитель). Генерация широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с помощью шумотрона была реализована не только в сантиметровом [10], но и в миллиметровом диапазоне длин волн [11]. В работе [12] было показано, что использование двух (линейного и нелинейного) пролетных клистронов вместо двух ЛБВ в схеме шумотрона приводит к генерации одиночных цугов, состоящих из светлых импульсов огибающей „гигантской“ амплитуды с длительностью порядка десятков наносекунд. Однако модификаций схемы шумотрона, в которых использовались бы два нелинейных СВЧ-усилителя, предложено не было.

В настоящей работе предложена модифицированная схема шумотрона для генерации темных импульсов огибающей. Она состоит из двух вакуумных СВЧ-



**Рис. 1.** *a* — блок-схема микроволнового вакуумного автогенератора хаотических темных импульсов огибающей; *b* — амплитудные характеристики ЛБВ-усилителя (кружки) и пролетного клистрона (квадраты), а также фазовая характеристика ЛБВ-усилителя (сплошная линия), измеренные на частоте  $f_0$ .

усилителей, один из которых (ЛБВ), работая в сильно нелинейном и бистабильном режимах, обеспечивает одновременно хаотизацию сигнала в кольце и неустойчивость его генерации, а другой (пролетный клистрон), работая в режиме максимальной выходной мощности, ограничивает рост амплитуды хаотического сигнала и его фильтрацию.

На рис. 1, *a* приведена модифицированная схема шумотрона, состоящего из ЛБВ-усилителя, выполненного на основе односекционной спиральной замедляющей системы с переменным шагом для диапазона частот 2–4 GHz, и пятирезонаторного пролетного клистрона средней мощности типа КУ-134Е с центральной частотой  $f_0 = 2797$  MHz. Вход и выход обоих вакуумных СВЧ-усилителей соединены последовательно друг с другом и охвачены цепью запаздывающей обратной связи. Уровень мощности сигнала на входе пролетного клистрона регулируется с помощью переменного аттенуатора. 90% мощности сигнала с выхода ЛБВ-усилителя возвращается обратно в кольцо, а 10% мощности сигнала ответвляется из кольца через направленный ответвитель на входы анализатора спектра E4408B и осциллографа реального времени Infiniium DSO81004B для анализа и последующей обработки. Осциллограф реального времени характеризуется полосой пропускания 10 GHz. Для анализа временных рядов частота дискретизации сигнала выбирается равной 20 GS/s. В этом случае глубина памяти составляет 2 млн точек.

На рис. 1, *b* приведены амплитудные характеристики ЛБВ-усилителя и пятирезонаторного пролетного кли-

строна, а также зависимость набег фазы сигнала от уровня его мощности на входе ЛБВ, измеренные на частоте  $f_0$ . Амплитудная и фазовая характеристики ЛБВ-усилителя получены при токе пучка  $I_{01} = 50$  mA и ускоряющем напряжении  $U_{01} = 2500$  V, а амплитудная характеристика пролетного клистрона — при токе пучка  $I_{02} = 36$  mA и ускоряющем напряжении  $U_{02} = 2300$  V. Из представленных на рис. 1, *b* результатов следует, что на амплитудной характеристике ЛБВ-усилителя наблюдаются два *N*-образных участка, возникновение которых связано с работой ЛБВ в нелинейном крестатронном режиме при нормированном уровне входной мощности  $P_{in}/P_{01} \gg 10^{-5}$ , где  $P_{01} = I_{01}U_{01}$ . Особенностью такого режима является изменение средней скорости электронного потока за счет увеличения амплитуды электромагнитной волны, распространяющейся вдоль замедляющей системы. Средняя скорость электронного потока то увеличивается, то, наоборот, уменьшается, оставаясь больше фазовой скорости электромагнитной волны. Такое поведение электронного потока является причиной образования минимумов и максимумов на амплитудной характеристике ЛБВ. Кроме того, в крестатронном режиме набег фазы СВЧ-сигнала меняется на величину порядка  $\pi$ . На рис. 1, *b* штрихпунктирными линиями показаны уровни  $P_{in}$  на входе ЛБВ-усилителя ( $P_1$ ) и пролетного клистрона ( $P_2$ ), при которых в автогенераторе с использованием данных СВЧ-усилителей генерируются темные импульсы огибающей. Видно, что ЛБВ работает на участке подъема второго *N*-образного участка амплитудной характеристики (сильно

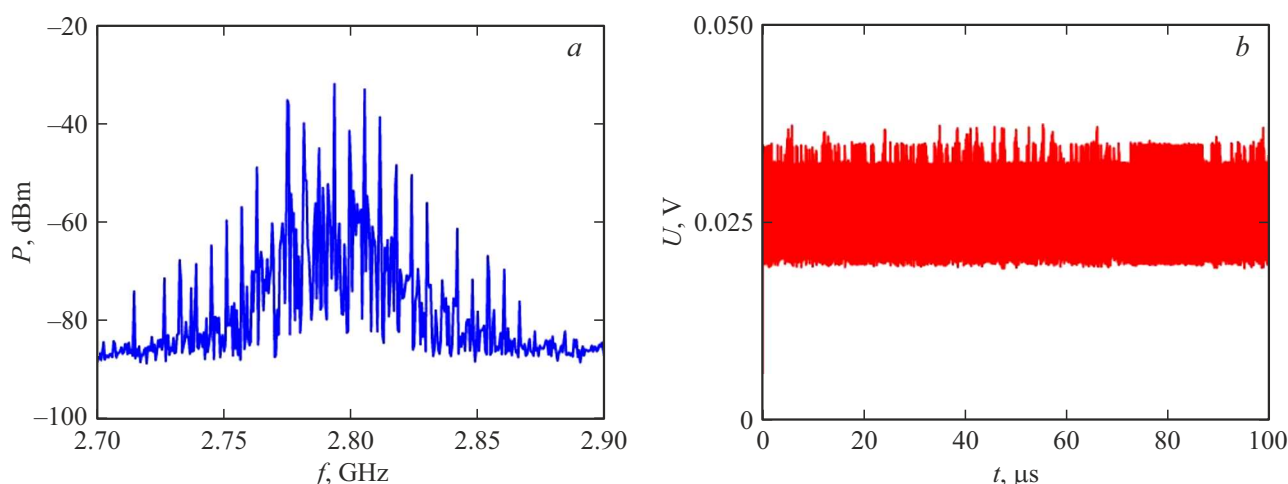


Рис. 2. Спектр мощности СВЧ-сигнала (а) и его огибающая (b), измеренные для тока пучка пролетного клистрона  $I_{02} = 34.5$  мА.

нелинейный режим), а пролетный клистрон — в режиме максимальной выходной мощности (слабо нелинейный режим).

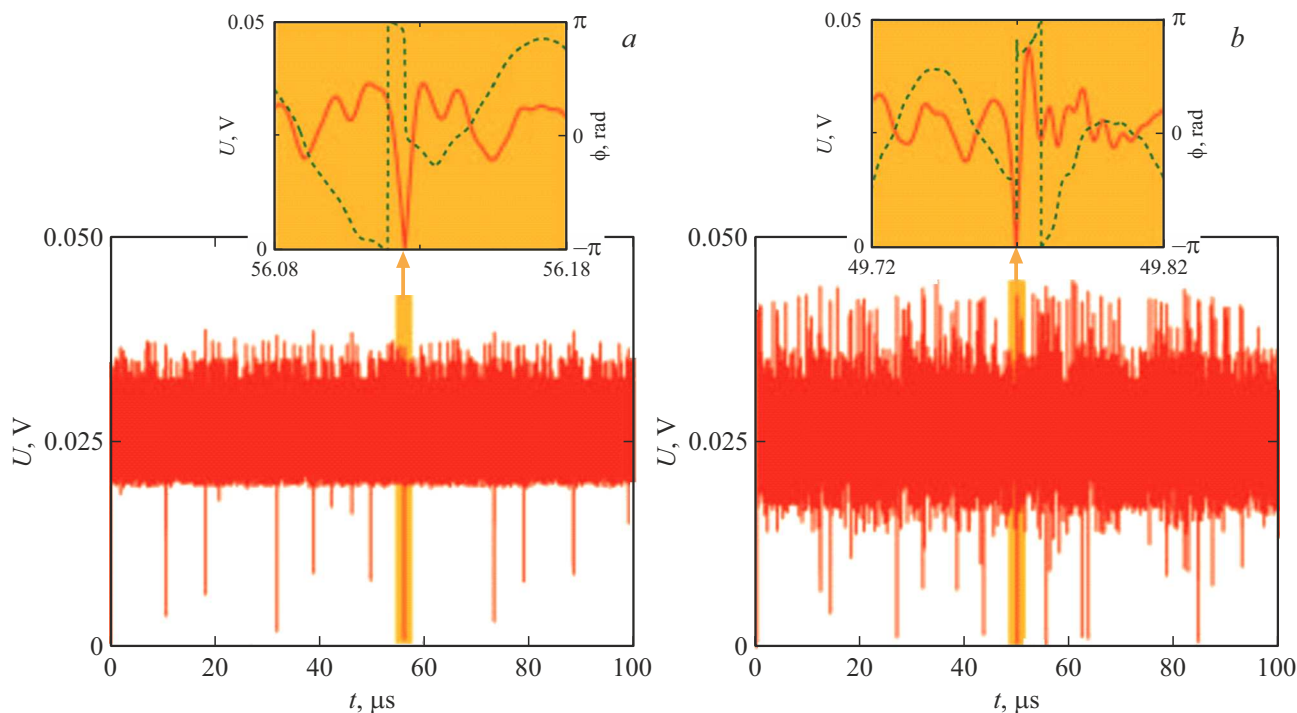
Управление режимами генерации сигнала в модифицированной схеме шумотрона осуществлялось путем изменения тока пучка пролетного клистрона, увеличение которого, как известно [13], приводит к росту коэффициента усиления клистрона. Остальные параметры СВЧ-усилителей (напряжение клистрона, а также напряжение и ток пучка ЛБВ) оставались постоянными. Генерация монохроматического СВЧ-сигнала возникала при  $I_{02} = 23$  мА на частоте доминантной кольцевой моды, соответствующей частоте  $f_0$ , когда пролетный клистрон работал в режиме линейного усиления сигнала, а ЛБВ-усилитель — в сильно нелинейном режиме. При дальнейшем увеличении тока пучка клистрона наблюдался переход к хаосу через известные механизмы модуляции сигнала (частотный и амплитудный) [14]. В этом случае ЛБВ-усилитель продолжал работать в сильно нелинейном режиме, а пролетный клистрон — в режиме линейного усиления сигнала.

На рис. 2 приведены спектральные и временные характеристики СВЧ-сигнала, полученные при токе пучка клистрона  $I_{02} = 34.5$  мА, когда в шумотроне устанавливался режим перемежаемости. В этом случае, хотя спектр мощности сигнала является шумоподобным, он содержит квазипериодически повторяющиеся выделенные спектральные составляющие, которые являются нестабильными во времени. Наличие таких особенностей у спектральной характеристики сигнала обусловлено тем, что во временной области есть интервалы, на которых наблюдается либо хаотическое, либо квазипериодическое изменение огибающей во времени.

Кардинальные изменения в хаотической динамике системы начинают происходить при  $I_{02} = 36$  мА (рис. 3, а), когда интегральная мощность хаотического сигнала на входе ЛБВ-усилителя соответствует значению  $P_1$ , а на входе пролетного клистрона — значе-

нию  $P_2$  (рис. 1, b). Как следует из результатов, представленных на рис. 3, а, режим перемежаемости сменяется режимом генерации уединенных узких провалов (темных импульсов огибающей), формирующихся на хаотическом амплитудном фоне. На вставке к рис. 3, а показан увеличенный фрагмент амплитудного и фазового профилей одного из таких провалов. Видно, что данные профили аналогичны амплитудному и фазовому профилям диссипативного темного солитона огибающей (амплитудный профиль является симметричным, а фаза внутри него претерпевает скачок на величину  $\sim \pi$ ). Полученные темные импульсы имеют длительность  $T_d \cong 10$  нс, которая определяется временем пролета пучка электронов вдоль замедляющей системы ЛБВ  $\tau = l/v_0 = 10.9$  нс (где  $l = 32.3$  см — длина замедляющей системы,  $v_0 = \sqrt{2U_{01}e/m}$  — начальная скорость электрона,  $e$  и  $m$  — заряд и масса покоя электрона), и усредненный на длине реализации период следования  $T_r \cong 7.4$  мкс, который обусловлен нелинейным взаимодействием многочастотного СВЧ-сигнала с электронным пучком в ЛБВ. Алгоритм расчета фазы огибающей СВЧ-сигнала основан на использовании преобразования Гильберта и подробно описан в [13].

Дальнейшее увеличение тока пучка клистрона до  $I_{02} = 45$  мА (рис. 3, b) приводит не только к уменьшению усредненного периода темных импульсов огибающей до  $T_r \cong 3.1$  мкс, но и к появлению „пичков“ в виде антитемных импульсов огибающей, амплитуда которых в отличие от светлых импульсов огибающей не спадает до уровня шумов, а спадает до уровня амплитудного фона. Кроме того, амплитуда таких импульсов возрастает с увеличением уровня мощности сигнала на входе ЛБВ-усилителя. При детальном рассмотрении увеличенного фрагмента временной реализации (вставка на рис. 3, b) становится видным связанное состояние темного и антитемного импульсов огибающей, амплитудный и фазовый профили которых схожи с амплитудным и фазовым профилями связанных темного и антитемного солитонов



**Рис. 3.** Временные ряды, измеренные для двух значений тока пучка пролетного клистрона  $I_{02} = 36$  (а) и  $45$  мА (б). На вставках показаны соответствующие увеличенные фрагменты темных импульсов огибающей.

огибающей. Существование последних было теоретически предсказано для бистабильных диспергирующих нелинейных сред [15]. О наличии бистабильности в исследуемом нами распределенном активном кольцевом резонаторе свидетельствует присутствие нескольких  $N$ -образных участков на амплитудной характеристике ЛБВ. Возникновение временной дисперсии обусловлено наличием характерных (резонансных) частот у многорезонаторного пролетного клистрона [13].

Механизм генерации темных импульсов огибающей обусловлен, на наш взгляд, срывом генерации хаотического СВЧ-сигнала за счет изменения в кольцевом резонаторе как амплитудных условий из-за уменьшения коэффициента усиления пролетного клистрона, так и фазовых условий вследствие сильной фазовой нелинейности ЛБВ. В результате амплитудные условия для возобновления генерации хаотического СВЧ-сигнала будут определяться невысоким значением коэффициента усиления ЛБВ, которому соответствует глобальный минимум на ее амплитудной характеристике, и максимальным значением коэффициента усиления пролетного клистрона, которому соответствует линейный участок амплитудной характеристики клистрона. Формирование связанных состояний в виде темных и антитемных импульсов огибающей происходит с участием уже двух (локального и глобального) минимумов на амплитудной характеристике ЛБВ. По аналогии с бистабильной „двухямной“ системой, описанной в работе [15], вблизи локального минимума, где коэффициент усиления ЛБВ выше, формируются антитемные импульсы огибающей,

а вблизи глобального минимума, где коэффициент усиления ЛБВ ниже, — темные импульсы огибающей.

В заключение отметим, что длительность хаотических темных импульсов огибающей линейно зависит от длины замедляющей системы и может достигать единиц наносекунд в  $X$ -диапазоне частот. Полученные результаты представляют интерес в плане развития методов нелинейной динамики для получения коротких импульсов в вакуумных генераторных схемах не только сантиметрового, но и миллиметрового и даже субмиллиметрового диапазонов длин волн.

### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-22-00274).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] П.Г. Крюков, *Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики* (Физматлит, М., 2008).
- [2] P. Grelu, N. Akhmediev, *Nat. Photon.*, **6**, 84 (2012). DOI: 10.1038/nphoton.2011.345
- [3] S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, O.I. Moskalenko, V.N. Skorokhodov, Yu.P. Sharaevskii, *Phys. Rev. E*, **98** (2), 022209 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevE.98.022209

- [4] N.S. Ginzburg, G.G. Denisov, M.N. Vilkov, A.S. Sergeev, S.V. Samsonov, A.M. Malkin, I.V. Zotova, *Phys. Rev. Appl.*, **13** (4), 044033 (2020).  
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.13.044033
- [5] A.S. Bir, S.V. Grishin, O.I. Moskalenko, A.N. Pavlov, M.O. Zhuravlev, D. Osuna Ruiz, *Phys. Rev. Lett.*, **125** (8), 083903 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.083903
- [6] B.A. Kalinikos, N.G. Kovshikov, C.E. Patton, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (19), 4301 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.4301
- [7] B.A. Kalinikos, M.M. Scott, C.E. Patton, *Phys. Rev. Lett.*, **84** (20), 4697 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4697
- [8] M. Wu, B.A. Kalinikos, C.E. Patton, *Phys. Rev. Lett.*, **95** (23), 237202 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.237202
- [9] Н.Н. Розанов, *Диссипативные оптические и родственные солитоны* (Физматлит, М., 2021).
- [10] В.Я. Кислов, Е.А. Мясин, Е.В. Богданов, а.с. № 1125735 (СССР) (23.11.1984). Бюл. 43.
- [11] Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, А.С. Сергеев, И.В. Зотова, *Письма в ЖТФ*, **43** (3), 50 (2017).  
DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56176.19516 [N.S. Ginzburg, R.M. Rozental, A.S. Sergeev, I.V. Zotova, *Tech. Phys. Lett.*, **43** (2), 162 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017020043].
- [12] С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, В.Н. Скороходов, *Письма в ЖТФ*, **45** (19), 33 (2019).  
DOI: 10.21883/PJTF.2023.18.56176.19516 [S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, V.N. Skorokhodov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (10), 989 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019100079].
- [13] С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, Т.М. Медведева, Д.В. Романенко, В.Н. Скороходов, И.В. Сысоев, М.В. Сысоева, Ю.П. Шараевский, *Изв. вузов. Радиофизика*, **62** (1), 37 (2019). [S.V. Grishin, B.S. Dmitriev, T.M. Medvedeva, D.V. Romanenko, V.N. Skorokhodov, I.V. Sysyoev, M.V. Sysyoeva, Yu.P. Sharaevskii, *Radiophys. Quantum Electron.*, **62** (1), 33 (2019).  
DOI: 10.1007/s11141-019-09952-3].
- [14] Ю.П. Блюх, М.Г. Любарский, В.О. Подобинский, Я.Б. Файнберг, *Физика плазмы*, **20** (7-8), 718 (1994). [Yu.P. Bliokh, M.G. Lyubarskii, V.O. Podobinskii, Ya.B. Fainberg, *Plasma Phys. Rep.*, **20** (8), 648 (1994).].
- [15] M. Crosta, A. Fratalocchi, S. Trillo, *Phys. Rev. A*, **84** (6), 063809 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.063809