

## Краткие сообщения

07

### Электронно-перестраиваемый спин-волновой оптоэлектронный генератор сверхвысокочастотных сигналов

© А.Б. Устинов, А.А. Никитин, Б.А. Калиникос

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,  
197376 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: ustinov-rus@mail.ru

(Поступило в Редакцию 11 марта 2015 г.)

Впервые экспериментально исследованы характеристики спин-волнового оптоэлектронного генератора сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов. Генератор представлял собой кольцевую схему, в СВЧ-тракте которой содержалась спин-волновая линия задержки, изготовленная на основе пленки железо-иттриевого граната. Оптический тракт содержал линию задержки из оптоволокна длиной 100 м. Показано, что использование спин-волновой линии задержки позволяет перестраивать частоту генерации в широких пределах при сохранении низкого уровня фазового шума. При этом на частотах гигагерцового диапазона уровень фазового шума составлял не более  $-110$  dBc/Hz при отстройке от несущей частоты на 10 kHz.

В настоящее время одним из наиболее перспективных способов генерации сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов с низким уровнем фазового шума является использование кольцевых оптоэлектронных генераторов [1,2], которые часто называют радиофотонными (Microwave Photonic) генераторами [3]. В большинстве случаев оптоэлектронный СВЧ генератор строится по кольцевой схеме, состоящей из радиочастотного и оптического трактов. В простейшем случае оптический тракт генератора состоит из лазерного модуля, электрооптического модулятора излучения, оптоволоконного кабеля (или миниатюрного оптического резонатора [4]) и фотодетектора. Основными элементами радиочастотного тракта являются СВЧ-усилитель и СВЧ-фильтр.

Как известно, кольцевые осцилляторы имеют много собственных мод, на которых возможна автогенерация сигнала. Для реализации одномодовой генерации необходимо реализовывать селекцию мод. Селекция может быть реализована различными способами, например, за счет применения узкополосных оптических или сверхвысокочастотных фильтров. В частности, для получения низких фазовых шумов обычно используются высокодобротные оптические фильтры в виде интерферометров Фабри-Перо или в виде оптических микрорезонаторов на модах шепчущей галереи [5].

На уровень фазовых шумов существенно влияет время задержки оптического и СВЧ-сигналов в соответствующих трактах. Так, например, в работе [6] показано, что увеличение длины оптоволокна от 100 до 4000 м приводит к снижению уровня фазовых шумов от  $-105$  до  $-135$  dBc/Hz (Здесь и ниже значения уровня фазового шума определены при отстройке на 10 kHz от частоты генерации.)

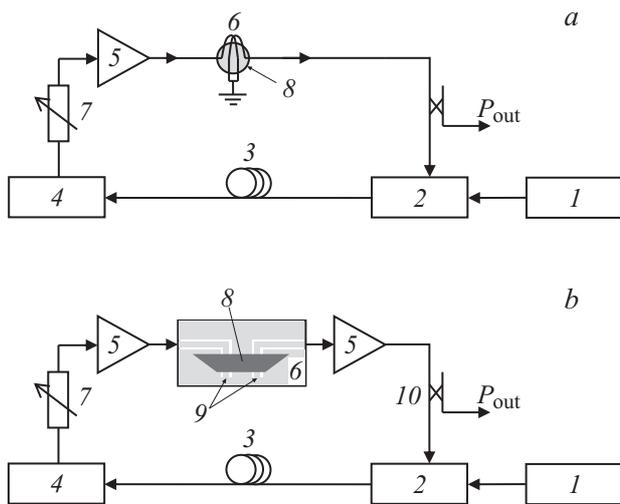
Для перестройки частоты генерации целесообразно использовать перестраиваемые по частоте фильтры. Однако известно, что увеличение диапазона перестройки

частоты приводит к увеличению фазовых шумов кольцевых СВЧ-генераторов. Одним из способов решения этой проблемы было применение двухзвенного СВЧ-фильтра на сферах ЖИГ [7–9].

Наряду со сферами ЖИГ на протяжении многих лет для построения различных СВЧ-устройств используются эпитаксиальные пленки ЖИГ (см., например, [10,11] и цитируемую в этих книгах литературу). Одним из преимуществ устройств на пленках ЖИГ является планарность конструкции, что позволяет создавать топологию фильтра в едином технологическом цикле и является более удобным для технических применений.

Целью данной работы являлось исследование характеристик перестраиваемого спин-волнового оптоэлектронного СВЧ-генератора, содержащего в качестве частото-задающего элемента пленочную спин-волновую линию задержки сверхвысокочастотного сигнала. Исследованные до настоящего времени перестраиваемые радиофотонные генераторы имели конструкцию, общий вид которой показан на рис. 1, а. В качестве частото-задающего элемента служил перестраиваемый СВЧ-фильтр б, изготовленный на основе сферического резонатора из ЖИГ 8, в основе принципа действия которого лежало явление ферромагнитного резонанса [12]. Остальными элементами генератора являлись: 1 — лазер, 2 — электрооптический модулятор, 3 — оптоволокно, 4 — фотодетектор, 5 — СВЧ-усилитель.

В настоящей работе для построения оптоэлектронного генератора впервые был использован полосно-пропускающий СВЧ-фильтр, построенный по схеме спин-волновой линии задержки [10,11]. Принцип его работы основан на возбуждении, распространении и приеме спиновых волн в пленке ЖИГ. Такие фильтры не только обеспечивают частотную фильтрацию, но и вносят в СВЧ-цепь время задержки, которое велико



**Рис. 1.** Блок-схемы разработанных ранее (а) и в настоящей работе (b) оптоэлектронных СВЧ-генераторов.

по сравнению со временем задержки обычных полосно-пропускающих резонансных СВЧ-фильтров. Это обусловлено сравнительно низкой групповой скоростью спиновых волн в пленках ЖИГ, которая составляет  $10^4 - 10^6$  м/с.

Блок-схема экспериментального макета генератора, исследованного в настоящей работе, изображена на рис. 1, b. Генератор представлял собой кольцевую схему, состоящую из оптического и радиочастотного трактов. Оптический тракт генератора был выполнен из коммерческих изделий: полупроводникового лазера 1 с длиной волны оптического излучения  $1.55 \mu\text{m}$ , электрооптического модулятора 2, оптоволоконного кабеля 3 длиной 100 м и полупроводникового фотодетектора 4. Верхняя рабочая частота фотодетектора составляла 1500 МГц. Основными элементами радиочастотного тракта являлись два одинаковых СВЧ-усилителя 5 и оригинальный спин-волновой СВЧ-фильтр 6. Суммарный коэффициент усиления в СВЧ-тракте регулировался переменным аттенюатором 7. Частотный диапазон СВЧ-усилителей составлял 650–1400 МГц. Отсюда частотный диапазон генерации СВЧ-сигнала лежал в этих же пределах.

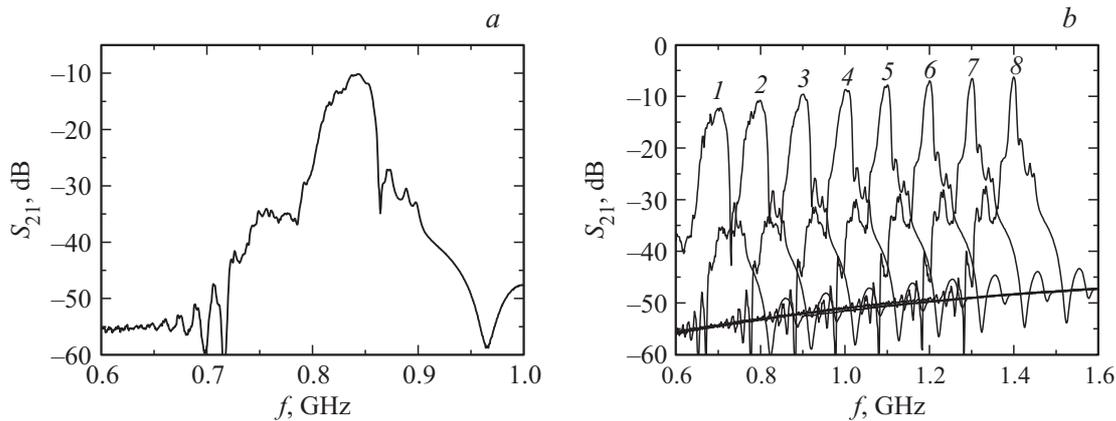
Как было сказано ранее, для осуществления электронной перестройки частоты генерируемого сигнала был изготовлен электронно-перестраиваемый СВЧ-фильтр на эпитаксиальной пленке ЖИГ 8. Фильтр имел копланарную конструкцию [13]. Для обеспечения работы фильтра при уровнях СВЧ-мощности, достигающих десятков милливатт на частотах 650–1400 МГц, была выбрана монокристаллическая пленка из замещенного железо-иттриевого граната. Пленка имела намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 280 \text{ G}$  и толщину  $83 \mu\text{m}$ . Для возбуждения и приема спиновых волн использовались копланарные антенны 9 длиной 3 мм, имеющие ширину центрального полоска  $500 \mu\text{m}$  и щели шириной  $250 \mu\text{m}$ , нанесенные на подложку из поликора

толщиной 1 мм (рис. 1, b). Расстояние между антеннами составляло 3 мм. Антенны питались от подводящих копланарных линий передачи, имевших волновое сопротивление 50 Ohm.

Рассмотрим принцип действия спин-волнового оптоэлектронного генератора. Лазерный диод 1 излучает непрерывное оптическое излучение, выполняющее функцию несущего сигнала. Электрооптический модулятор 2 модулирует амплитуду оптического излучения СВЧ-сигналом, поступающим из радиочастотного тракта. Модулированное оптическое излучение, распространяясь по оптоволоконному кабелю 3, задерживается на время  $\tau_{\text{opt}}$  и детектируется фотодиодом 4 (рис. 1, b). Детектированный оптический сигнал на выходе фотодиода представляет собой сверхвысокочастотный сигнал. Этот сигнал усиливается с помощью СВЧ-усилителя 5 и поступает на частотоподающий фильтрующий элемент — спин-волновую линию задержки 6. Подчеркнем, что она выполняет две функции: фильтрации и задержки СВЧ-сигнала рабочей частоты на время  $\tau_{\text{sw}}$ . Далее СВЧ-сигнал еще раз усиливается и подается на электрооптический модулятор 2, замыкая кольцевую схему. Заметим, что пара СВЧ-усилителей 5 компенсирует суммарные потери на распространение СВЧ-сигнала в кольце. Небольшая часть СВЧ-сигнала выводится из кольца направленным ответвителем 10 с коэффициентом связи  $-10 \text{ dB}$ .

Эксперименты проводились в три этапа. На первом этапе измерялись характеристики оптического тракта. Для этого от генератора Agilent 83752A СВЧ-сигнал подавался на управляющий порт электрооптического модулятора. Сверхвысокочастотный сигнал фотодетектора делился, после чего одна из частей подавалась на широкополосный СВЧ-осциллограф Tektronix DPO 7354, а другая часть подавалась на анализатор спектра Tektronix RSA 5126B. Измерения показали, что глубина модуляции оптического излучения составляла 50–100% при подаче на электрооптический модулятор СВЧ-сигнала мощностью 7–12 dBm. Потери мощности СВЧ-сигнала между входом электрооптического модулятора и выходом фотодетектора составляли приблизительно 55 dBm.

На втором этапе проводились измерения параметров элементов, входящих в СВЧ-тракт. Измерения показали, что СВЧ-усилители в частотном диапазоне 650–1400 МГц работают в линейном режиме, обеспечивая выходную мощность до 22 dBm и коэффициент усиления 34 dB. Типичные характеристики спин-волнового полосно-пропускающего СВЧ-фильтра на касательно намагниченной пленке ЖИГ, измеренные для внешнего магнитного поля 180 Oe при падающей СВЧ-мощности 0 dBm, показаны на рис. 2, a. Минимальные вносимые потери величиной  $-10.1 \text{ dB}$  имели место на частоте 842 МГц. На этой частоте время задержки составляло 21 ns. Исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра при разных значениях падающей мощности показали, что вносимые потери при увеличении мощности до 13 dBm практически не



**Рис. 2.** Амплитудно-частотная характеристика спин-волнового фильтра, измеренная для магнитного поля 180 Oe (а), и перестройка его полосы пропускания (b) в магнитных полях  $H$ , Oe: 1 — 135, 2 — 167, 3 — 202, 4 — 237, 5 — 272, 6 — 305, 7 — 342, 8 — 377.

изменяются. При дальнейшем увеличении мощности до 20 dBm потери возрастают до 11.5 dB. На рис. 2, b показана перестройка АЧХ-фильтра по частоте за счет увеличения внешнего магнитного поля от 135 до 377 Oe. Видно, что с ростом частоты минимальные вносимые потери уменьшаются от  $-12.4$  до  $-6.5$  dB. Это происходит за счет улучшения согласования антенн спиновых волн с подводимым СВЧ-трактом.

Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод о том, что все элементы СВЧ-тракта работали в линейном режиме. При этом суммарное усиление СВЧ-сигнала в радиочастотном тракте могло компенсировать потери в спин-волновом фильтре и оптическом тракте на величину, достаточную для обеспечения глубины модуляции оптического излучения на 50–100%. Ограничение СВЧ-мощности в режиме генерации обеспечивалось лазером и интегрально-оптическим модулятором. Поскольку последний является интерферометром Маха-Цендера, изменение интенсивности оптического излучения лежит в пределах от 0 до  $I_{\max}$  (где  $I_{\max}$  — интенсивность оптического излучения лазера) вне зависимости от уровня мощности модулирующего СВЧ-излучения.

На третьем этапе экспериментов собиралась кольцевая схема, показанная на рис. 2, b, и проводилось исследование генерации СВЧ-сигнала в ней. По мере уменьшения потерь в радиочастотном тракте переменным аттенуатором 7 в кольце возникала автогенерация монохроматического СВЧ-сигнала. При подмагничивании пленки ЖИГ полем в 180 Oe частота генерируемого сигнала составляла 842 MHz, что соответствовало частоте минимального затухания спин-волнового СВЧ-фильтра. Типичная гармоника генерации и спектр фазового шума показаны на рис. 3, a и 3, b соответственно. Видно, что фазовый шум генератора составлял  $-110$  dBc/Hz. При увеличении магнитного поля от 135 до 375 Oe частота генерации изменялась от 700 до 1400 MHz (рис. 3, c). Значение фазового шума, измеренное при отстройке от центральной несущей частоты на 10 kHz, практически не

изменялось. Отметим, что аналогичные измерения для случая оптоволоконного кабеля длиной 200 м показали уменьшение фазового шума до  $-114$  dBc/Hz.

На рис. 3, b кроме экспериментальной зависимости (сплошная линия) показана теоретическая зависимость (пунктирная линия) спектра фазового шума. Последняя была рассчитана при помощи теоретической модели спин-волнового радиофотонного генератора, изложенной в работе [14]

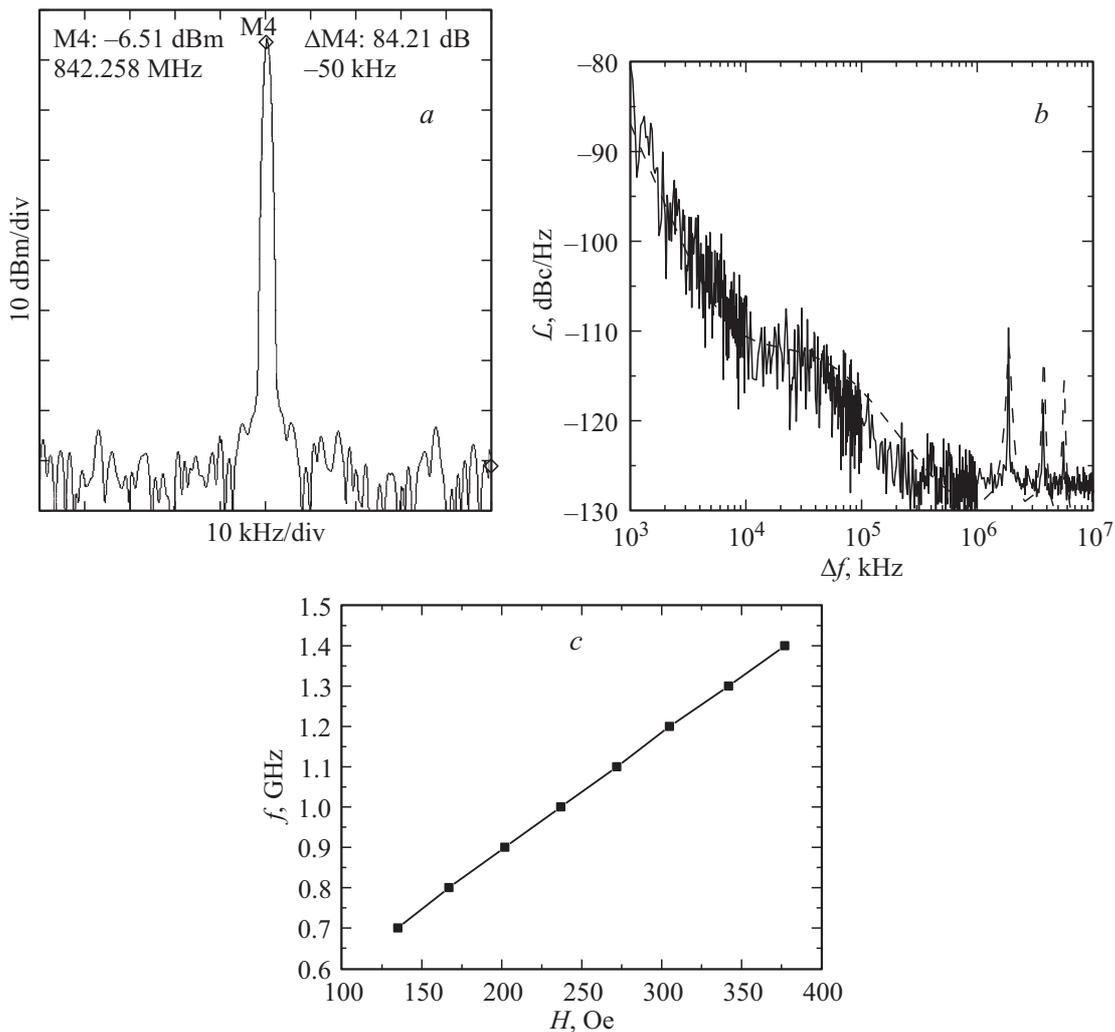
Поясним функционирование спин-волнового радиофотонного генератора с качественных позиций. Стационарный режим работы генератора определяется двумя условиями: баланса фаз и баланса амплитуд. В описываемом генераторе, в отличие от радиофотонных генераторов с СВЧ-фильтрами на сферах ЖИГ, частоты генерации определяются условием баланса фаз, учитывающим как фазовый набег оптического излучения в оптоволокне, так и фазовый набег спиновых волн в пленочном СВЧ-фильтре. Это условие имеет вид

$$k_{\text{opt}}l_{\text{opt}} + k_{\text{sw}}l_{\text{sw}} + k_e l_e = 2\pi n, \quad (1)$$

где  $k_{\text{opt}}$  — волновое число несущей волны в оптоволоконной линии,  $l_{\text{opt}}$  — длина оптоволоконного кабеля,  $k_{\text{sw}}$  — волновое число спиновой волны в пленке ЖИГ на частоте генерации  $f_0$ ,  $l_{\text{sw}}$  — расстояние между копланарными антеннами,  $k_e$  — волновое число СВЧ-сигнала в электронных цепях схемы,  $l_e$  — суммарная длина электронных цепей,  $n$  — целое положительное число, нумерующее моды генерации. Условие баланса амплитуд имеет следующий вид:

$$\alpha_{\text{opt}}l_{\text{opt}} + \alpha_{\text{sw}}l_{\text{sw}} + \alpha_e l_e = g, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\text{opt}}$  — декремент пространственного затухания несущей волны в оптоволоконной линии,  $\alpha_{\text{sw}}$  — декремент пространственного затухания спиновой волны в пленке ЖИГ на частоте генерации  $f_0$ ,  $\alpha_e$  — декремент пространственного затухания СВЧ-сигнала в электронных



**Рис. 3.** Спектр генерируемого СВЧ-сигнала (а), спектр фазового шума (b) и частота генерации в зависимости от магнитного поля (c).

цепях схемы,  $g$  — суммарный коэффициент усиления. Условия (1) и (2) определяют форму амплитудно-частотной характеристики кольцевой схемы  $\mathbf{H}_p(f)$ . Так, условие (1) определяет положение резонансных частот гармоник, а условие (2) определяет амплитуды гармоник. Одновременное выполнение этих условий приводит к тому, что на пороге генерации возникает генерация одной гармоники с минимальными потерями.

В режиме автогенерации одной гармоники ее фазовый шум  $\mathcal{L}(f)$  был рассчитан по следующей формуле:

$$\mathcal{L}(f) = 10 \log_{10}(\mathbf{H}_p(f) S_\psi(f) / 2), \quad (3)$$

где

$$S_\psi(f) = \sum_{j=-4}^0 b_j f^j$$

— спектральная плотность мощности источников шума, описываемая степенным рядом [15]. Как показано в [15], каждый из коэффициентов  $b_j$  описывает поведение фазового шума на отдельных частотных участках зависимости  $S_\psi(f)$ , определяя ее наклон. Коэффициенты  $b_0$

и  $b_{-2}$  определяют спектральные плотности мощности „белого“ фазового и частотного шумов соответственно. Коэффициенты  $b_{-1}$  и  $b_{-3}$  определяют спектральные плотности мощности фазового и частотного фликкер-шума. Коэффициент  $b_{-4}$  определяется шум случайных блужданий. Коэффициенты  $b_j$  были найдены как подгонные параметры из условия совпадения теоретической и экспериментальной зависимостей. Они имеют следующие значения:  $b_0 = 2.1 \cdot 10^{-12}$ ,  $b_{-1} = b_{-2} = b_{-3} = 0$ ,  $b_{-4} = 12$ . Такие значения являются вполне разумными.

Из проведенного исследования следует, что разработанный перестраиваемый спин-волновой оптоволоконный СВЧ-генератор имеет конкурентно способные характеристики по сравнению с существующими аналогами. Реализованный в экспериментах метод магнитной перестройки может быть распространен на другие типы оптоэлектронных генераторов. При этом для понижения уровня фазовых шумов можно предложить увеличение времени задержки сигналов не только в оптическом, но и в спин-волновом радиочастотном тракте.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 13-02-12414\_офи\_м2, 14-02-00496\_А, грантом президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ № НШ-4109.2014.2, а также госзаданиями Минобрнауки РФ.

## Список литературы

- [1] Yao X.S., Maleki L. // J. Opt. Soc. Am. B. 1996. Vol. 13. N 8. P. 1725–1735.
- [2] Белкин М., Лопарев А. // Электроника НТБ. 2010. Вып. 6. С. 62–70.
- [3] Yao J. // J. Lightwave Technol. 2009. Vol. 27. N 3. P. 314–335.
- [4] Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. // Phys. Lett. A. 1989. Vol. 137. N 7, 8. P. 393–397.
- [5] Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011. 416 с.
- [6] Volyanskiy K., Cussey J., Tavernier H., Salzenstein P., Sauvage G., Larger L., Rubiola E. // J. Opt. Soc. Am. B. 2008. Vol. 25. N 12. P. 2140–2150.
- [7] Elyahu D., Maleki L. // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2003. Vol. 3. P. 2185–2187.
- [8] Белкин М.Е., Лопарев А.В. // Нано- и микросистемная техника. 2011. Вып. 9. С. 29–33.
- [9] Zhu D., Pan S., Ben D. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. Vol. 24. N 3. P. 194–196.
- [10] Ваишковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: СГУ, 1993. 312 с.
- [11] Калиникос Б.А., Устинов А.Б., Баруздин С.А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры / Под ред. В.Н. Ушакова. Монография. М.: Радиотехника, 2013. 216 с.
- [12] Rogozin V.V., Чуркин В.И. Ферритовые фильтры и ограничители мощности. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
- [13] А.с. № 801747 СССР, МКЛ<sup>3</sup> Н03 Н9/125. Устройство для возбуждения и передачи спиновых волн / Калиникос Б.А., Ковалева М.К., Ковшиков Н.Г. 1979. № 2830675.
- [14] Никитин А.А., Калиникос Б.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 9. С. 141–145.
- [15] Rubiola E. Phase noise and frequency stability in oscillators. Cambridge University Press, 2009. 228 p.