

# Управление электрическим током короткими импульсами огибающей в кольцевом автогенераторе с насыщающимся усилителем и нелинейным магнетонным кристаллом с динамическим line-дефектом

А.С. Бир, Д.В. Романенко, С.В. Гришин

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** в работе показано управление электрическим током скважностью темных импульсов огибающей наносекундной длительности, генерируемых кольцевой автоколебательной системой, в цепи обратной связи которой находятся два нелинейных элемента: магнетонный кристалл (МК) с динамическим line-дефектом и транзисторный усилитель. МК поддерживает трехволновый параметрический распад поверхностной магнетостатической спиновой волны (ПМСВ) на обменные СВ, а усилитель работает в режиме насыщения выходной мощности. Установлено, что эффективное управление импульсами обусловлено изменением внутреннего магнитного поля МК электрическим током, приводящим к изменению уровня потерь ПМСВ на частоте запрещенной зоны.

**Ключевые слова:** спиновые волны, магнетонный кристалл, параметрическая неустойчивость, автогенератор, короткие импульсы

## 1. Введение

В последние годы активно проводятся исследования по созданию в микроволновом диапазоне частот автономных источников импульсных сигналов ультракороткой длительности (УКИ). Такие источники представляют собой кольцевые автогенераторы, в цепи обратной связи которых содержатся либо одиночный нелинейный элемент в виде насыщающегося поглотителя, выполненного, например, из ЛБВ-подавителя [1], либо комбинация из двух нелинейных элементов, одним из которых является изогнутый магнетонный микроволновод, поддерживающий трех- и четырехволновые нелинейные спин-волновые взаимодействия, а другим – транзисторный усилитель, работающий в режиме насыщения выходной мощности [2, 3]. В первом случае генерируются периодические последовательности мощных диссипативных солитонов огибающей, являющихся «светлыми» УКИ субнаносекундной длительности. Во втором случае получена генерация диссипативных многосолитонных комплексов, состоящих из «темных» импульсов с длительностью порядка сотни наносекунд, в которые вложены темные УКИ огибающей нано- [2] и даже субнаносекундной [3] длительности. Управление характеристиками темных УКИ осуществлялось механически с помощью переменного аттенюатора, который изменял уровень мощности сигнала на входе одного из нелинейных элементов.

В настоящей работе представлены результаты динамического управления скважностью темных коротких импульсов огибающей, когда они генерируются в запрещенной зоне магнетонного кристалла (МК), используемого в качестве нелинейного элемента в активном кольцевом резонаторе.

## 2. Макет автогенератора коротких темных импульсов

На рисунке 1а приведена схема кольцевого автогенератора на основе одномерного (1D) МК, изготовленного из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной

10 мкм с намагниченностью насыщения  $4\pi M_0 = 1750$  Гс, выращенной на подложке гадолиний галлиевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм с использованием метода жидкофазной эпитаксии. МК представляет собой периодическую структуру в виде столбиков и канавок с периодом  $T = 200$  мкм, которая сформирована на поверхности пленки ЖИГ с использованием методов травления и литографии. Столбики и канавки имеют одинаковую ширину - 100 мкм. Канавки характеризуются глубиной травления 1 мкм. Внешнее постоянное магнитное поле  $H_0 = 356$  Э приложено касательно к поверхности МК и направлено параллельно входному микрополосковому преобразователю. Такая конфигурация поля поддерживает распространение поверхностной магнитостатической спиновой волны (ПМСВ). Выбор величины поля  $H_0$  обусловлен необходимостью создания условий для развития в МК трехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий. Динамический line-дефект создается проволочным проводником, расположенным вдоль продольной оси симметрии МК и вблизи его поверхности. Сам проволочный проводник подключен к источнику постоянного электрического тока. В зависимости от полярности электрического тока внутреннее магнитное поле МК может как увеличиваться, так и уменьшаться, в области динамического line-дефекта. В автогенераторе, помимо МК, используется усилительный каскад, состоящий из клистрона-усилителя и двух транзисторных усилителей, которые необходимы для компенсации потерь в полосе непропускания МК. Выходной усилитель каскада работает в режиме насыщения выходной мощности, а оставшиеся два усилителя - в режиме линейного усиления сигнала. Помимо этого, клистрон-усилитель, являясь усилителем резонансного типа с центральной частотой  $\sim 2.8$  ГГц, настраивается на запрещенную зону МК, в которой реализуются амплитудные и фазовые условия генерации сигнала. Уровень мощности сигнала на входе МК регулируется с помощью переменного аттенуатора. Генерируемый в кольце СВЧ-сигнал через направленные ответвители поступает на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки.

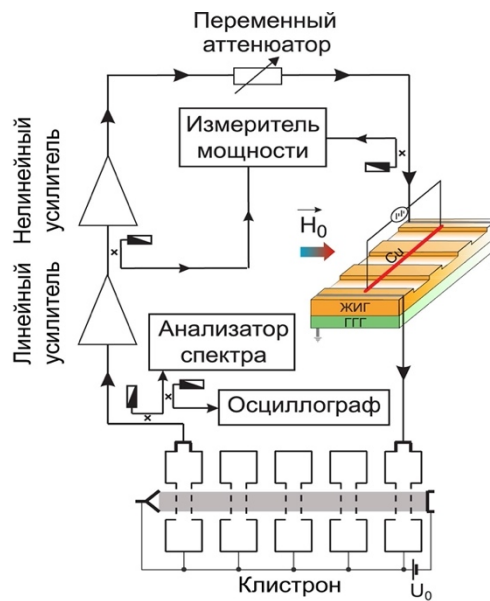
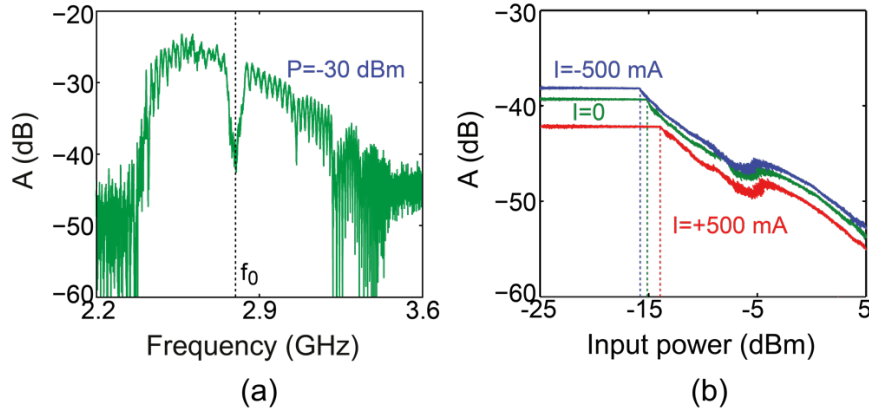


Рисунок 1. Блок-схема кольцевого автогенератора коротких темных импульсов.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

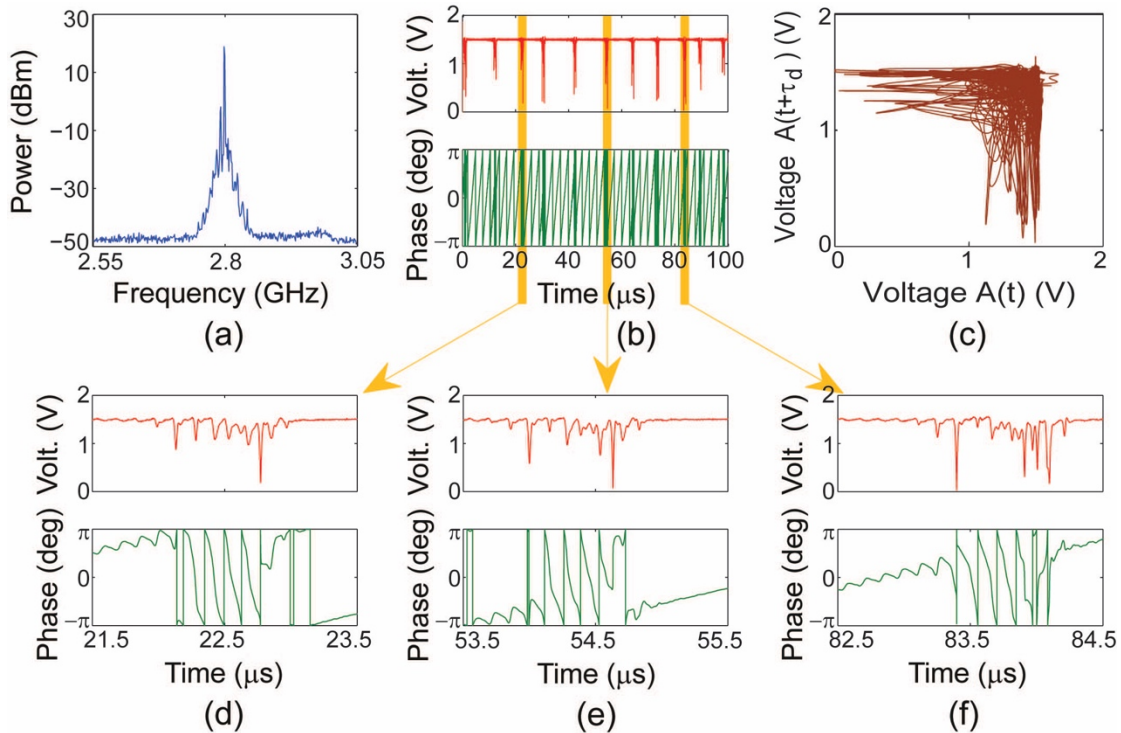
На рисунке 2а приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) 1D МК, измеренная в линейном режиме. Видно, что в спектре ПМСВ существует полоса не-

пропускания, центральная частота которой  $f_0=2797$  МГц соответствует частоте первого брегговского резонанса. На рисунке 2b приведены зависимости уровня мощности на выходе МК от уровня мощности на его входе, полученные в отсутствие и при наличии постоянного электрического тока разной полярности. Из представленных на рисунке 2b результатов следует, что наличие тока разной полярности приводит к изменению не только уровня линейных, но и уровня нелинейных потерь ПМСВ. При положительной полярности тока потери возрастают, а при отрицательной полярности тока, наоборот, уменьшаются.



**Рисунок 2.** (а) АЧХ МК, измеренная в линейном режиме в отсутствие постоянного тока. (б) Амплитудные характеристики МК, измеренные на частоте  $f_0$  в отсутствие и при наличии постоянного тока разной полярности.

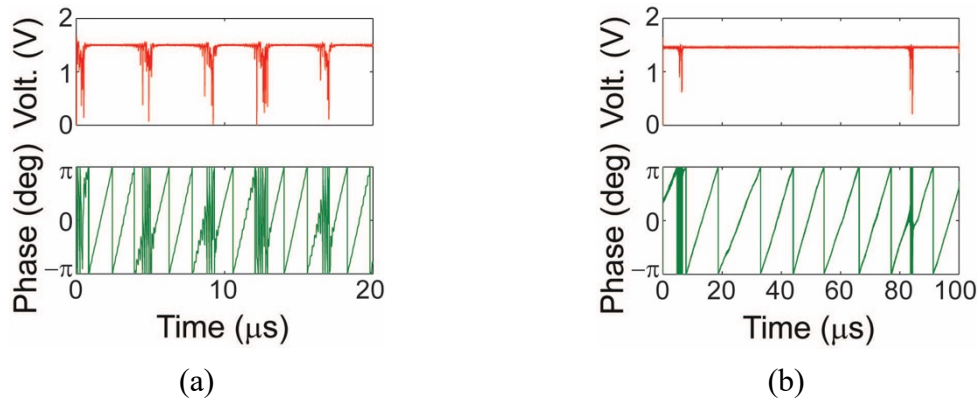
На рисунке 3 приведены спектр мощности, временные реализации и фазовый портрет генерируемых темных коротких импульсов огибающей, измеренные при коэффициенте усиления кольца  $G=31$  дБ (где  $G=K-A$ ,  $K$  – коэффициент усиления усилительного каскада,  $A$  – общие потери сигнала в кольце). В этом случае средняя



**Рисунок3.** Спектр мощности (а), временные реализации (амплитуды и фазы) (b, d, e f) и фазовый портрет (с) темных импульсов огибающей, генерируемых в кольцевом автогенераторе в отсутствие постоянного тока.

мощность сигнала на входе МК имеет значение  $P=+3$  дБмВт, при котором развиваются трехволновые нелинейные процессы взаимодействия спиновых волн. Выходной усилитель каскада работает в режиме глубокого насыщения выходной мощности. Видно, что в отсутствие постоянного тока ( $I=0$ ) в кольце формируется хаотическая последовательность цугов, состоящих из темных коротких импульсов огибающей длительностью  $\sim 30$  нс. Усредненная на длине реализации частота следования цугов имеет значение  $f_{am} \sim 100$  кГц, которое соответствует частоте автомодуляции параметрически возбуждаемых СВ, рожденных в результате трехволновых процессов распада ПМСВ. В тоже самое время, наличие внутри цугов хаотически чередующихся темных импульсов огибающей с частотами следования, не превышающими 2 МГц, свидетельствует о том, что они рождены в результате трехволновых процессов слияния СВ [4].

На рисунке 4 приведены результаты, полученные при подаче на проволочный проводник постоянного тока разной полярности. Видно, что при положительной полярности тока частота  $f_{am}$  увеличивается до значения  $\sim 274$  кГц, а при отрицательной полярности тока, наоборот, уменьшается до значения  $\sim 13$  кГц. Таким образом, изменяя внутреннее магнитное поле МК, мы перестраиваем полосу не пропускаения МК, что приводит к изменению уровня надкритичности относительно порога трехволновых нелинейных спин-волновых взаимодействий.



**Рисунок4.** Временные реализации (амплитуды и фазы) темных импульсов огибающей, измеренные при двух значениях постоянного тока  $I$ : +320 мА (а) и -200 мА (b).

#### 4. Генераторная модель и результаты численного моделирования

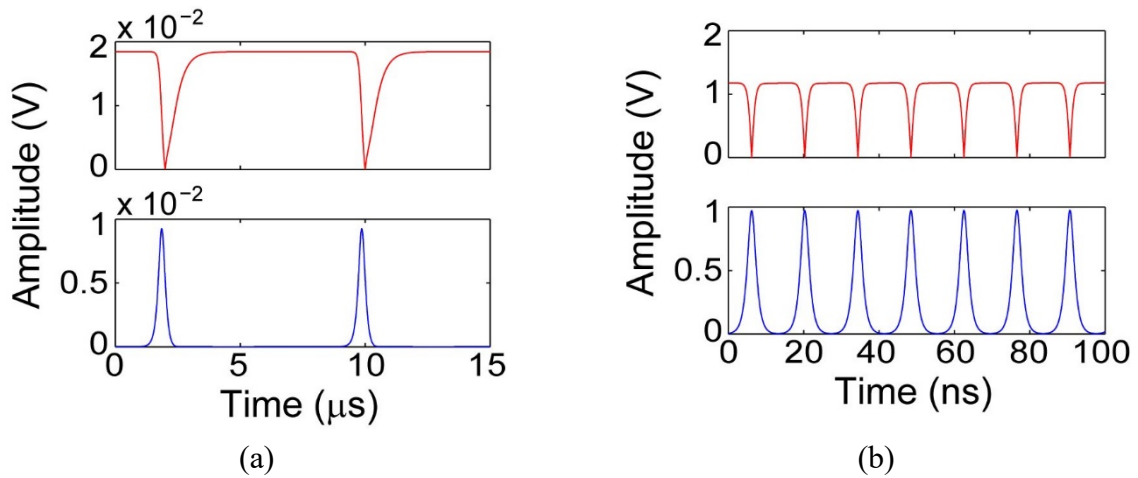
Генераторная модель разработана на основе параметрической волновой модели Вышкинд-Рабиновича [5] при учете нелинейного усиления, которая описывается системой трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial m(t)}{\partial t} &= -c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \eta m(t) + \gamma \{1 - \tanh[\alpha |m(t)|]\} m(t), \\ \frac{\partial b_1(t)}{\partial t} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t), \\ \frac{\partial b_2(t)}{\partial t} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m(t)$  – комплексная амплитуда огибающей ПМСВ,  $b_{1,2}(t)$  – комплексные амплитуды

огибающих параметрически возбуждаемых СВ,  $\delta$  – отстройка частоты СВ от половинного значения частоты ПМСВ,  $\eta$  - коэффициент затухания ПМСВ,  $\nu$  - коэффициент затухания СВ,  $\gamma$  - коэффициент линейного усиления и  $\alpha$  – параметр нелинейности.

На рисунке 5 приведены результаты расчета, полученные вблизи и вдали от порога параметрического взаимодействия спиновых волн. Видно, что в обоих случаях наличие нелинейного усиления приводит к ограничению роста амплитуды ПМСВ во времени. В результате такого ограничения на амплитудном профиле ПМСВ образуется плато, содержащее провалы, внутри которых амплитуда ПМСВ спадает до нуля. Указанные провалы имеют несимметричный вид вблизи параметрического порога генерации (см. рисунок 5а). Вдали от порога их вид становится более симметричными, а сами провалы в этом случае напоминают темные солитоноподобные импульсы (см. рисунок 5б). Кроме того, период следования темных импульсов вблизи параметрического порога, гораздо больше, чем вдали от него.



**Рисунок 5.** Амплитудные профили темных импульсов огибающей ПМСВ (верхняя панель) и светлых импульсов огибающей СВ (нижняя панель), рассчитанные по параметрической генераторной модели (а) вблизи порога трехволнового взаимодействия ( $\alpha=63.6$ ,  $\gamma=8$  мкс<sup>-1</sup>,  $\delta=10$ -25 мкс<sup>-1</sup>) и (б) вдали от порога трехволнового взаимодействия ( $\alpha=1.38$ ,  $\gamma=30$  мкс<sup>-1</sup>,  $\delta=10^{-1}$  мкс<sup>-1</sup>). Расчеты выполнены для  $c_0=1232$  мкс<sup>-1</sup>,  $c_1=c_2=846$  мкс<sup>-1</sup>,  $\nu=7$  мкс<sup>-1</sup> и  $\eta=1.4$  мкс<sup>-1</sup>.

## 5. Заключение

В заключение отметим, что проведенные в работе исследования указывают на возможность генерации и управления с помощью постоянного тока скважностью темных коротких импульсов огибающей в кольцевых генераторах с нелинейными устройствами магноники.

Работа выполнена за счет **гранта Российского Научного Фонда (проект № 19-79-20121)**.

### Список литературы

1. Ginzburg N. S. et al. Generation of trains of ultrashort microwave pulses by two coupled helical gyro-TWTs operating in regimes of amplification and nonlinear absorption// Phys. Plasm. – 2017 – V. 24. – No 2 – P. 023103.
2. Бир А.С. и др. Генерация темных многосолитонных комплексов в магнном кольцевом резонаторе с управлением дисперсией и конкурирующими нелинейными спин-волновыми взаимодействиями // Письма в ЖЭТФ. - 2019. - Т. 110. Вып. 5. - С. 348 – 353.
3. Bir A.S. et al. Experimental observation of ultrashort hyperchaotic dark multisoliton complexes in a magnonic active ring resonator// Phys. Rev. Lett. - 2020. - V. 125. - No 8. - P. 083903.

4. Гришин С.В. и др. Излучение шумоподобных спин-волновых пакетов при трехмагнонных процессах распада и кинетической неустойчивости волн в ферромагнитной пленке // Письма в ЖЭТФ. - 2009. - Т. 89. - № 2. - С. 59-63.
5. Вышкинд С.Я. и др. Механизм стохастизации фаз и структура волновой турбулентности в диссипативных средах// ЖЭТФ. - 1976. - Т. 71. - № 2. - С. 557-569.