

# Вычислительные способности магнонного физического резервуара на основе металлизированной пленки ЖИГ

А.В. Кондрашов<sup>1</sup>, М.П. Костылев<sup>2</sup>, А.Б. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>University of Western Australia

**Аннотация:** недавние исследования показали, что спин-волновые активные кольцевые резонаторы на пленках железо-иттриевого граната (ЖИГ) могут быть использованы как основа для создания магнонных резервуарных компьютеров. Спин-волновая линия задержки обуславливает в такой системе кратковременную память и нелинейность. Обе эти характеристики зависят от конструкции спин-волновой линии задержки. В данной работе мы экспериментально сравниваем вычислительные способности резервуарных компьютеров на основе металлизированной и неметаллизированной пленок. В качестве основных метрик используются емкости теста кратковременной памяти (ТКП) и теста проверки четности (ТПЧ). Исследования показывают, что использование металлизированных пленок позволяет заметно улучшить характеристики магнонного резервуарного компьютера.

**Ключевые слова:** физические резервуарные вычисления, магноника, нелинейные спиновые волны, нейронные сети

## 1. Введение

Резервуарные компьютеры (РК) представляют собой особый вид рекуррентных нейронных сетей (РНН), используемых для анализа и классификации сигналов во временной области, таких как речь, хаотические временные реализации и пр.[1]. Главным отличием РК является то, что в нем нет сети сложно связанных узлов или «нейронов» как в традиционных РНН. Вместо сети используется резервуар - динамическая система, состояние которой описывается некоторым набором параметров. Информационный сигнал вводится в резервуар в качестве внешнего воздействия, а для обучения и обработки используется отклик резервуара на это воздействие. Основным требованием к динамической системе, используемой в качестве резервуара, является зависимость ее состояния от ранее введенных сигналов, а также нелинейная связь отклика с информационным сигналом.

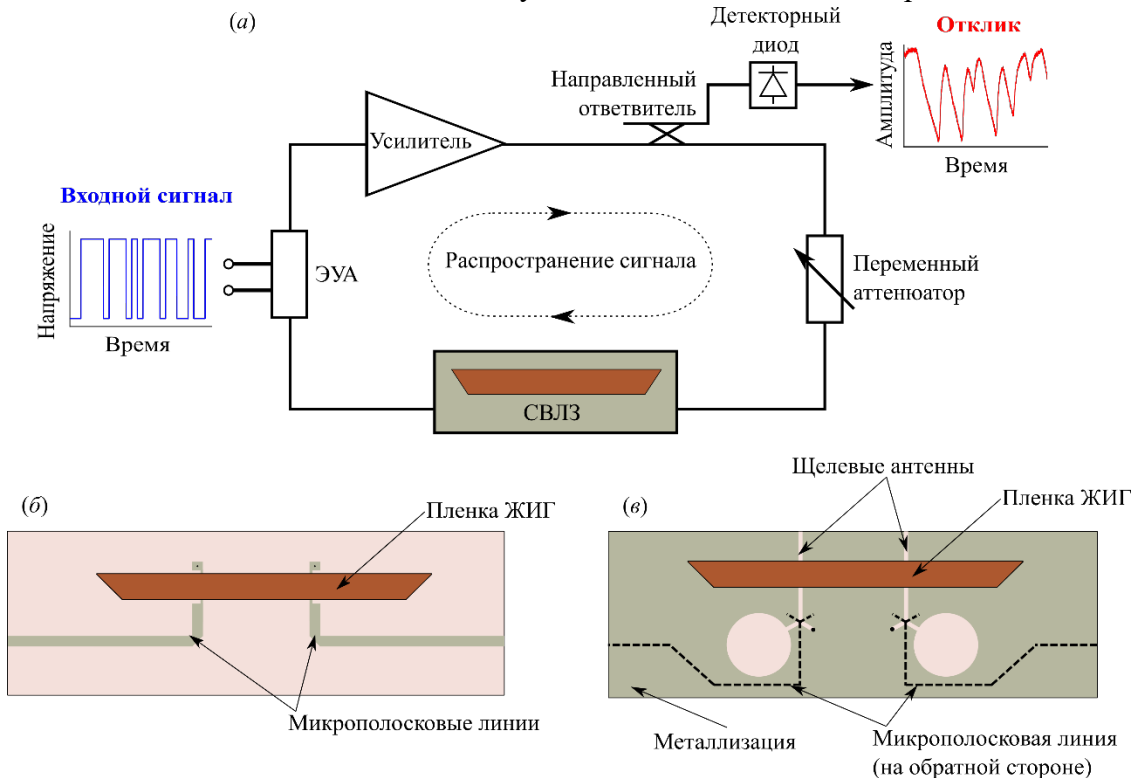
Динамические процессы, возникающие в магнитных материалах, могут удовлетворить обоим этим требованиям [2-5]. Так в недавних работах [6-8] было показано, что в качестве резервуара могут быть использованы активные кольцевые резонаторы (АКР) на основе спин-волновой линии задержки (СВЛЗ). Однако первые экспериментальные исследования показали относительно невысокие вычислительные способности таких систем. Численное моделирование работы магнонного резервуарного компьютера (МРК) продемонстрировало, что путем выбора характеристик элементов АКР можно повысить вычислительные способности магнонного резервуарного компьютера [7,8].

В данной работе мы с помощью теста кратковременной памяти (ТКП) и теста проверки четности (ТПЧ) сравниваем вычислительные способности резервуарных компьютеров на основе спин-волновых линий задержки, где в качестве волноведущей среды используется металлизированная пленка или неметаллизированная.

## 2. Экспериментальный макет

Блок-схема МРК на спин-волновом АКР, показана на рисунке 1(а). Нелинейным элементом резервуара является спин-волновая линия задержки на основе эпитаксиальной пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 5,2 мкм, длиной 15 мм и шириной 2 мм. Пленка намагничена постоянным магнитным полем напряженностью 760Э. Направление намагничивания выбрано таким, чтобы в пленке распространялись поверхностные спиновые волны (ПСВ). Для возбуждения и приема ПСВ используются планарные СВЧ микроволноводы. Интенсивные спиновые волны, распространяющиеся в пленке, обеспечивают выполнение обоих необходимых условий – кратковременной памяти и нелинейности. Первое определяется временем распространения спиновых волн в пленке, второе – возникновением нелинейного затухания при высокой интенсивности спиновых волн.

Цепь положительной обратной связи включает в себя электронно-управляемый аттенюатор (ЭУА), СВЧ усилитель, направленный ответвитель и переменный аттенюатор. ЭУА используется для ввода входного сигнала в резервуар. Его коэффициент затухания зависит от напряжения на управляющем электроде. Усилитель компенсирует потери, возникающие в кольце, благодаря чему в АКР возникает автогенерация СВЧ монохроматического сигнала. Направленный ответвитель позволяет вывести часть сигнала из кольца для его дальнейшего анализа в спектральной и временной областях. В качестве отклика резервуара используется огибающая ответвленного сигнала, полученная с помощью детекторного диода.



**Рисунок 1.** Блок-схема резервуарного компьютера (а), конструкция СВЛЗ на неметаллизированной (б) и металлизированной (в) пленках.

В данной работе использованы два вида спин-волновых линий задержки. В первом случае для возбуждения и приема используются традиционные микрополосковые линии передач шириной 50 мкм (рис. 1(б)), а во втором – щелевые линии передач с шириной щели 50 мкм (рис. 1(в)). В обоих случаях расстояние между антеннами было выбрано равным 10 мм. Отметим, что во втором случае конструкция антенн выполнена

таким образом, что пленка ЖИГ оказывается металлизированной с одной стороны, из-за чего дисперсия ПСВ значительно изменяется. Изменение дисперсии приводит к увеличению скорости распространения ПСВ в металлизированной пленке и уменьшению времени задержки. Так в СВЛЗ на металлизированной пленке оно составило 74 нс, а в неметаллизированной 120 нс. Помимо этого, наличие металлизации приводит к росту порога возникновения модуляционной неустойчивости [9] – нелинейного процесса более высокого порядка, нарушающего правильную работу резервуара. Благодаря этому в металлизированной пленке могут распространяться интенсивные ПСВ без распада на параметрические волны, а значит нелинейное затухание будет более развитым.

### 3. Экспериментальные результаты

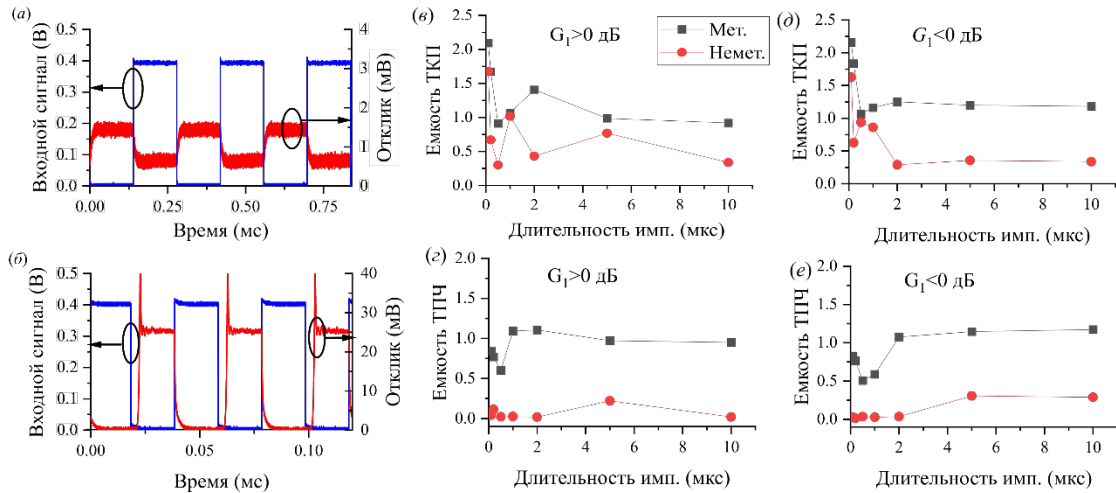
Для исследования вычислительных способностей магнотронного резервуарного компьютера были использованы две общепринятые метрики: емкость теста кратковременной памяти (ТКП) и емкость теста проверки четности (ТПЧ). Оба теста используют в качестве входного сигнала случайную битовую последовательность. Первый тест проверяет можно ли восстановить ранее введенный сигнал, используя текущее состояние резервуара. Второй заключается в определении четности суммы введенных битовых последовательностей. Результаты первого зависят только от величины кратковременной памяти, второй зависит одновременно от нелинейности и памяти резервуара. Таким образом, оба этих теста позволяют охарактеризовать основные параметры резервуара, определяющие вычислительные способности МРК.

Для ввода в резервуар битовые последовательности преобразовывались в электрический сигнал. Логической единице соответствовало напряжение 0.4 В, логическому нулю – 0 В. Напряжение, соответствующее одному биту, подавалось на вход в течение некоторого времени, которое мы будем называть длительность импульса, после чего переключалось в соответствии со следующим битом последовательности. Время переключения входного напряжения между нулем и единицей составляло примерно 20 нс. Полученный импульсный сигнал подавался на вход электронно-управляемого аттенюатора. При подаче высокого напряжения ослабление в аттенюаторе увеличивалось, а амплитуда генерируемого сигнала уменьшалась (см. рис 2(а)). При определенных условиях потери в ЭУА настолько вырастали, что генерация прекращалась, а амплитуда циркулирующего сигнала становилась равна нулю (см. рис 2(б)).

Переход между двумя устойчивыми состояниями в резервуаре происходит не мгновенно, а требует некоторого времени. Так в случае СВЛЗ на металлизированной пленке время перехода составляло порядка единиц микросекунд, а в случае неметаллизированной пленки при определенных условиях могло достигать десятков микросекунд. Время переходных процессов наряду с временем задержки в СВЛЗ и длительностью импульсов являются характеристическими временами, определяющими память резервуарного компьютера и как следствие вычислительные способности резервуарного компьютера. При этом первые две зависят от конструкции линии задержки, а последнее – переменная, которой мы можем управлять.

На рисунке 2(в,г) приведены зависимости емкостей ТКП и ТПЧ тестов от длительности импульсов для разной конструкции резервуара. Графики получены в условиях, когда в кольце генерация не прекращалась ( $G_1 > 0$  дБ), и когда при подаче напряжения логической единицы ( $G_1 < 0$  дБ) генерация прекращалась. Влияние длительности импульсов на емкости носит традиционный характер. С увеличением длительности импульса за время единичного воздействия резервуар успевает перейти в стационарное состояние, на которое ранее введенные сигналы не оказывают воздействия. Поэтому емкость ТКП плавно падает. Однако на коротких временных

интервалах отклик резервуара становится линейным, что приводит к низким значениям емкости ТПЧ. При использовании более длинных импульсов Переходные процессы становятся более нелинейными и емкость ТПЧ увеличивается.



**Рисунок 2.** Отклик резервуара на импульсную последовательность при использовании и неметаллизированной (а) металлизированной (б) пленок, емкости ТКП (в,д) и ТПЧ (з,е) для разных конструкций СВЛЗ и разных режимов работы резервуара.

Главный вывод, который следует из полученных результатов – использование металлизированной пленки более выгодно с точки зрения вычислительной способности резервуара. Высокое значение емкостей обусловлено в первую очередь формой выходной временной реализацией. При использовании металлизированной пленки амплитуда выходного сигнала возрастает более чем в двадцать раз (см. рис. 2(а,б)), из-за чего влияние шума на результаты обработки временных реализаций снижается. С другой стороны, большая амплитуда генерируемого сигнала приводит к более интенсивному влиянию нелинейности на динамику спиновых волн, увеличивая таким образом не только емкость ТКП, но и ТКЧ.

Работа выполнена при поддержке **Министерства науки и высшего образования РФ (“Госзадание” № FSEE-2020-0005).**

#### Список литературы

1. Nakajima K., Fischer I. Reservoir computing. – Springer Singapore, 2021.
2. Tsunegi S. et al. Physical reservoir computing based on spin torque oscillator with forced synchronization //Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 114. – №. 16.
3. Jiang W. et al. Physical reservoir computing using magnetic skyrmion memristor and spin torque nano-oscillator //Applied Physics Letters. – 2019. – Т. 115. – №. 19.
4. Nakane R., Tanaka G., Hirose A. Reservoir computing with spin waves excited in a garnet film //IEEE access. – 2018. – Т. 6. – С. 4462-4469.
5. Papp A., Csaba G., Porod W. Characterization of nonlinear spin-wave interference by reservoir-computing metrics //Applied Physics Letters. – 2021. – Т. 119. – №. 11.
6. Watt S., Kostylev M. Reservoir computing using a spin-wave delay-line active-ring resonator based on yttrium-iron-garnet film //Physical Review Applied. – 2020. – Т. 13. – №. 3. – С. 034057.
7. Nikitin A. A. et al. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing //Journal of Applied Physics. – 2022. – Т. 131. – №. 11.
8. Kondrashov A. V. et al. Numerical simulation of performance of magnonic reservoir computer based on active-ring oscillator //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 563. – С. 169968.
9. Kozin A. E., Ustinov A. B. Nonlinear damping and nonlinear phase shift of intense spin waves in screened ferrite films //Technical Physics. – 2019. – Т. 64. – №. 2. – С. 265-269.