

Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ" на основе наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн

Р. В. Гапончик^{1✉}, И. Ю. Таценко¹, В. В. Витько¹
А. А. Сташкевич², Т. Гото³, А. Б. Устинов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Университет Сорбонна Париж Север, Вильтанёз, Франция

³Университет Тохоку, Сэндай, Япония

✉ ferumno33@gmail.com

Аннотация

Введение. В последние годы наблюдается рост интереса к исследованию нелинейных свойств спиновых волн. Были исследованы такие нелинейные явления, как солитоны огибающей, нелинейный сдвиг собственных частот интесивных спиновых волн и многие др. Однако ряд важных вопросов остается неизученным. Сюда можно отнести задачу исследования наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн. Интерес к такому исследованию обусловлен необходимостью разработки спин-волновых логических элементов, управление которыми происходило бы с помощью изменения фазы рабочей спиновой волны.

Цель работы. Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ", в основе работы которого лежит эффект наведенного нелинейного сдвига фазы рабочей спиновой волны.

Материалы и методы. С помощью оригинальной теории проводится моделирование амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ". Обосновывается принцип его работы. С помощью векторного анализатора цепей экспериментально показывается возможность реализации логической функции "исключающее ИЛИ-НЕ" в схеме по типу спин-волнового интерферометра Маха–Цендера.

Результаты. Проведено экспериментальное исследование наведенного нелинейного сдвига фазы рабочих сигналов, падающих на идентичные нелинейные спин-волновые фазовращатели (НФВ), расположенные в плечах логического элемента. Показано, что с ростом мощности сигнала накачки до 60 мВт, подающегося на нелинейные фазовращатели, происходит наведенный нелинейный сдвиг фазы рабочего сигнала более, чем на 180°, что обуславливает возможность использования НФВ для построения спин-волновых логических элементов. Также экспериментально исследован принцип действия спин-волнового логического элемента. Показано, что в низкочастотной области АЧХ устройства реализуется логическая функция "исключающее ИЛИ-НЕ".

Заключение. Проведено численное моделирование характеристик спин-волнового логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ", построенного по схеме интерферометра Маха–Цендера. Показано, что логические функции выполняются за счет эффекта наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн в нелинейных фазовращателях, расположенных в разных плечах логического элемента.

Ключевые слова: спиновые волны, нелинейный логический элемент, пленка железоиттриевого граната

Для цитирования: Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ" на основе наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн / Р. В. Гапончик, И. Ю. Таценко, В. В. Витько, А. А. Сташкевич, Т. Гото, А. Б. Устинов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 6. С. 54–63. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-54-63

Источник финансирования. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ЯОПН, проект № 21-52-50006

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023; принята к публикации после рецензирования 27.11.2023; опубликована онлайн 29.12.2023

Investigation of a Nonlinear XNOR Logic Gate Based on an Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves

Roman V. Haponchyk^{1✉}, Ivan Yu. Tatsenko¹, Vitalii V. Vitko¹,
Andrey A. Stashkevich², Taichi Goto³, Alexey B. Ustinov¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

³Tohoku University, Sendai, Japan

✉ferumno33@gmail.com

Abstract

Introduction. Recent years have seen a growing interest in studying the nonlinear properties of spin waves. Nonlinear phenomena, such as envelope solitons, nonlinear frequency shifts of intense spin waves, and etc., have attracted particular attention. However, a number of important issues remain to be underexplored, including the problem of induced nonlinear phase shift of spin waves. The relevance of this problem is related to the need to develop spin-wave logic gates that could be controlled by changing the spin wave phase.

Aim. To study a nonlinear XNOR logic gate whose operation is based on the induced nonlinear phase shift of a spin wave.

Materials and methods. An original theory is used to simulate the frequency response of a nonlinear XNOR logic gate. The operating principle of the nonlinear XNOR logic gate is substantiated. The possibility of implementing the nonlinear XNOR logic gate in a circuit similar to a spin-wave Mach-Zehnder interferometer is experimentally demonstrated.

Results. An experimental study of the induced nonlinear phase shift of operating signals incident on identical nonlinear spin-wave phase shifters located in the arms of the logic gate was carried out. It is shown that an increase in the pump signal power up to 60 mW, supplied to nonlinear phase shifters, changes the induced nonlinear phase shift of the operating signal by more than 180°. Hence, nonlinear phase shifters can be used for constructing spin-wave logic gates. In addition, the operating principle of a spin-wave logic gate was experimentally studied. It is shown that the XNOR logical function is implemented in the low-frequency part of the device's frequency response characteristic.

Conclusion. Numerical simulation of the characteristics of a nonlinear XNOR logic gate based on the Mach-Zehnder interferometer circuit was carried out. It is shown that its logical functions are implemented due to the effect of an induced nonlinear phase shift of spin waves in nonlinear phase shifters located in different arms of the logic gate.

Keywords: spin waves, nonlinear logic gate, yttrium iron garnet (YIG) films

For citation: Haponchyk R. V., Tatsenko I. Yu., Vitko V. V., Stashkevich A. A., Goto T., Ustinov A. B. Investigation of a Nonlinear XNOR Logic Gate Based on an Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 6, pp. 54–63. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-6-54-63

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR and JSPS, project no. 21-52-50006.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 26.10.2023; accepted 27.11.2023; published online 29.12.2023

Введение. Одним из актуальных разделов в современной науке является магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники, изучающее перенос информации в твердотельных периодических и однородных магнитных структурах с помощью магнонов – квантов спиновых волн (СВ) [1]. Характеристики СВ могут изменяться в зависимости от многих параметров, включая выбор магнитного материала, формы образца, а также в зависимости от ориентации и напряженности магнитного поля по отношению к образцу [2]. Все это в сочетании с широким набором линейных и нелинейных свойств СВ делает магнонику перспективным направлением для различного рода исследований и разработок.

При исследовании СВ до недавнего времени основное внимание уделялось изучению их линейного распространения в магнитных периодических структурах [3–9], получивших в начале первого десятилетия XXI в. название "магнонных кристаллов" по аналогии с фотонными кристаллами.

Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ" на основе наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн

Investigation of a Nonlinear XNOR Logic Gate Based on an Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves

ными кристаллами [1]. На основе периодических и однородных магнитных пленочных волноводов были разработаны элементы магнотонной логики [10], имеющие конструкцию спин-волнового интерферометра [11].

В последнее десятилетие наблюдается возрастание интереса к исследованию нелинейных свойств СВ, распространяющихся в ферромагнитных пленках. Были исследованы такие нелинейные явления, как солитоны огибающей [12–14], нелинейный сдвиг собственных частот интенсивных СВ [15] и наведенный нелинейный сдвиг фазы СВ в ферромагнитных пленках [16] и магнотонных кристаллах [17]. Исследования наведенного нелинейного сдвига фазы СВ обусловлены необходимостью разработки спин-волновых (магнотонных) логических схем, в которых выходной магнотонный сигнал предыдущего логического элемента управлял бы магнотонным сигналом последующего логического элемента [18].

Моделирование характеристик спин-волнового логического элемента. Элемент спин-волновой логики, который описывается в настоящей статье, построен по схеме нелинейного интерферометра типа Маха–Цендера. В плечах нелинейного интерферометра содержатся нелинейные спин-волновые фазовращатели – элементы, отвечающие за изменение фазы рабочей СВ. Фаза сигнала на выходе таких фазовращателей зависит от мощности сверхвысокочастотного (СВЧ) сигнала накачки, а также от параметров ферромагнитной пленки.

Общая блок-схема элементов магнотонной логики представлена на рис. 1. Элементы име-

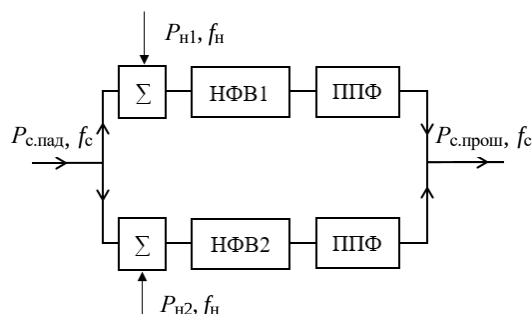


Рис. 1. Блок-схема нелинейного элемента магнотонной логики, управляемого сигналами накачки

Fig. 1. Block-diagram of the nonlinear magnonic logic gate controlled by pump signals

ют вид двухплечевой мостовой схемы. Схема состоит из делителя СВЧ-мощности, двух нелинейных спин-волновых фазовращателей НФВ1 и НФВ2, сумматоров СВЧ-мощности, а также полосно-пропускающих фильтров ППФ, используемых для подавления сигнала накачки. Работа нелинейного логического элемента заключается в прохождении двух рабочих СВЧ-сигналов сравнительно малой амплитуды на частоте f_c в его разных плечах и приобретении определенных фазовых сдвигов. Далее 2 этих сигнала суммируются и интерферируют. Приобретенные фазовые сдвиги в НФВ1 и НФВ2 управляются подачей сигнала накачки на частоте f_n . В результате сложения рабочих сигналов с разными фазами изменяется уровень мощности выходного сигнала логического элемента. В зависимости от начального соотношения разности фаз интерферирующих сигналов такая схема может реализовывать ту или иную логическую функцию.

Моделирование характеристик логических элементов проводилось с учетом модели наведенного нелинейного сдвига фазы СВ. Мощность выходного сигнала рассчитывалась по формуле для интерференции волн:

$$P_{c, \text{прош}} = P_{\text{прош1}} + P_{\text{прош2}} + 2\sqrt{P_{\text{прош1}}P_{\text{прош2}}} \cos(\Delta\varphi),$$

где $P_{\text{прош1}}$ и $P_{\text{прош2}}$ – мощности рабочих сигналов, прошедших через первое и второе плечо; $\Delta\varphi = \varphi_1 + \varphi_{\text{INL1}} - \varphi_2 - \varphi_{\text{INL2}}$ – разность фаз складываемых сигналов, которая является функцией частоты и мощностей сигналов накачки P_{n1} и P_{n2} ; φ_1 и φ_2 – линейные фазовые набеги, приобретаемые в НФВ1 и НФВ2; φ_{INL1} и φ_{INL2} – наведенные нелинейные сдвиги фазы в НФВ1 и НФВ2. Наведенный нелинейный сдвиг фазы СВ в нелинейных фазовращателях рассчитывался с помощью модели, приведенной в [16].

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) логического элемента (по мощности) рассчитывалась по формуле

$$H = \frac{P_{\text{с.прош}}}{P_{\text{с.пад}}},$$

где $P_{\text{с.прош}}$ – мощность с выхода логического элемента; $P_{\text{с.пад}}$ – мощность, подающаяся на вход логического элемента.

С использованием данного подхода был промоделирован нелинейный логический элемент "исключающее ИЛИ-НЕ". Данная функция реализуется подачей на НФВ1 и НФВ2 мощностей накачки в соответствии с таблицей истинности выбранной функции. Здесь и далее за мощность будем принимать значения безразмерного квадрата амплитуды СВ накачки $|U_{\omega 2}|^2$. Когда на НФВ1 подается мощность накачки, равная 0.028 о. е., на выходе логического элемента реализуется логическая "1", при подаче мощности, равной 0 о. е. – реализуется логический "0". Второй НФВ2 работает по аналогичному принципу. Линейный рабочий сигнал, проходя плечи интерферометра, приобретает дополнительный наведенный нелинейный сдвиг фазы. Далее 2 сигнала с измененными фазами суммируются либо в противофазе с получением на выходе слабого сигнала, который соответствует логическому "0", либо синфазно с получением на выходе сравнительно сильного сигнала, соответствующего логической "1". Промоделированная АЧХ данного элемента представлена на рис. 2. Параметры, используемые при расчете: тип волны – поверхностная СВ, внешнее подмагничивающее поле

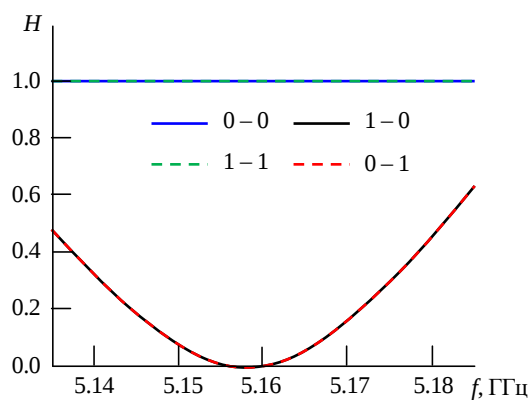


Рис. 2. АЧХ логического элемента, полученная при моделировании логической функции "исключающее ИЛИ-НЕ"

Fig. 2. Simulated frequency response of the XNOR logic gate

Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ" на основе наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн
Investigation of a Nonlinear XNOR Logic Gate Based on an Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves

$H = 87\,500$ А/м; намагниченность насыщения пленки железоиттриевого граната (ЖИГ) $M = 0.2$ Тл; расстояние между антеннами в НФВ1, 2 одинаковое и равно $d_{1,2} = 3$ мм; полуширина кривой ферромагнитного резонанса $\Delta H = 47.7$ А/м; толщина пленки ЖИГ $L = 5.5$ мкм. Частоты рабочего сигнала лежали в диапазоне от 5.135 до 5.185 ГГц, а частота сигнала накачки была равна 5.275 ГГц.

Экспериментальное исследование спин-волнового логического элемента. Структурная схема экспериментальной установки для измерений характеристик магнитного логического элемента показана на рис. 3. Цифрами обозначены: 1 – СВЧ-делитель; 2 – СВЧ-сумматоры; 3 – нелинейные фазовращатели; 4 – векторный анализатор цепей; 5 – СВЧ-генераторы; 6 – постоянные магниты.

Непрерывный рабочий СВЧ-сигнал низкой мощности с частотой f_c подавался с первого порта векторного анализатора цепей 4 на делитель 1, минуя делитель сигналы падали на сумматоры 2. Непрерывные СВЧ-сигналы накачки создавались СВЧ-генераторами 5, затем они подавались на сумматоры 2, где суммировались с рабочим сигналом. После прохождения сумматоров оба сигнала подавались на вход экспериментальных макетов НФВ1, 2 3, которые находились в постоянном магнитном поле магнитов 6. С выхода фазовращателей сигналы суммировались и уходили на второй порт векторного анализатора цепей, в котором при измерении АЧХ в полосе частот рабочих сигналов сигнал накачки отфильтровывался.

Нелинейные фазовращатели (рис. 4) имели практически одинаковые конструктивные пара-

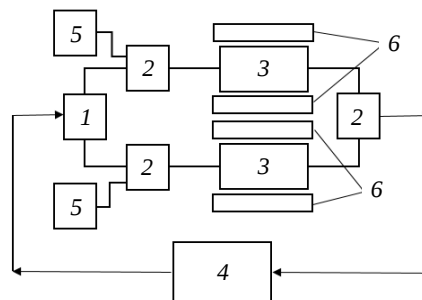


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки

Fig. 3. Diagram of the experimental setup

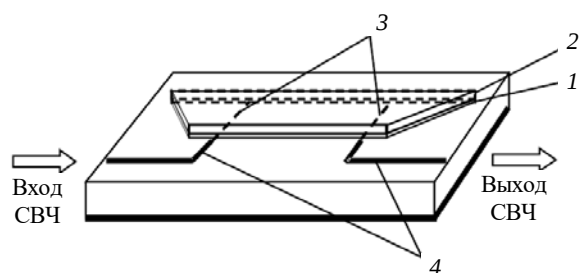


Рис. 4. Макет нелинейного фазовращателя на пленке ЖИГ
Fig. 4. Diagram of a nonlinear phase shifter based on an YIG film метры. Они были изготовлены на основе пленок ЖИГ 1, эпитаксиально выращенных на подложках галлий-гадолиниевого граната 2. Возбуждение и прием СВ в НФВ осуществлялись микрополосковыми антеннами 3. Длина микрополосковых антенн была 2 мм, а их ширина составляла 50 мкм. Микрополосковые линии 4 с волновым сопротивлением 50 Ом использовались для подвода СВЧ-сигнала к входной антенне и отвода прошедшего СВЧ-сигнала от выходной антенны.

Эксперимент проводился с поверхностными СВ. Для этого были изготовлены две одинаковые пленки ЖИГ толщиной $L = 5.7$ мкм. Расстояние между микрополосковыми антеннами было 7 мм. Намагниченность насыщения пленки составляла 0.175 Тл, полуширина кривой ферромагнитного резонанса равнялась 23.8 А/м . Напряженность внешнего подмагничивающего поля была $93\,600 \text{ А/м}$.

Измерения проводились в несколько этапов. На первом этапе вход и выход экспериментальных макетов НФВ подключались напрямую к

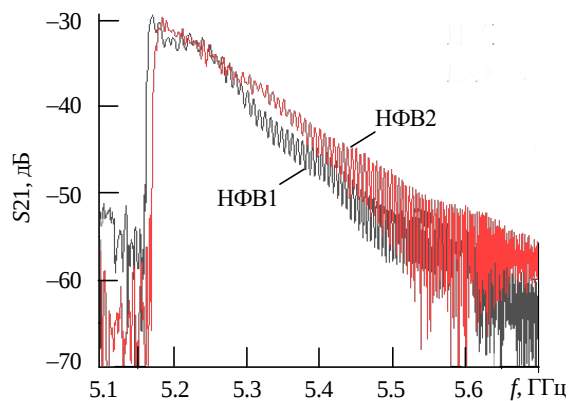


Рис. 5. АЧХ макетов НФВ

Fig. 5. NPS frequency response

векторному анализатору цепей. Измерялись АЧХ исследуемых НФВ (рис. 5). Измерения проводились для случая линейного распространения СВ в НФВ. При этом мощность тестового сигнала от векторного анализатора цепей составляла 0.1 мВт.

Второй этап заключался в измерении наведенного нелинейного сдвига фазы рабочего сигнала с частотой $f_c = 5.2106$ ГГц в фазовращателях НФВ1 и НФВ2. Для этого оба макета подключались к измерительной схеме. Результаты показывают, что при подаче сигнала накачки с частотой $f_{H1} = 5.5$ ГГц на НФВ1 в нем возникает наведенный нелинейный сдвиг фазы рабочего сигнала, зависящий от мощности накачки (рис. 6, а). Это приводит к значительному изменению коэффициента передачи логического элемента в низкочастотной области АЧХ (рис. 7). При $P_H = 56$ мВт синфазная интерфе-

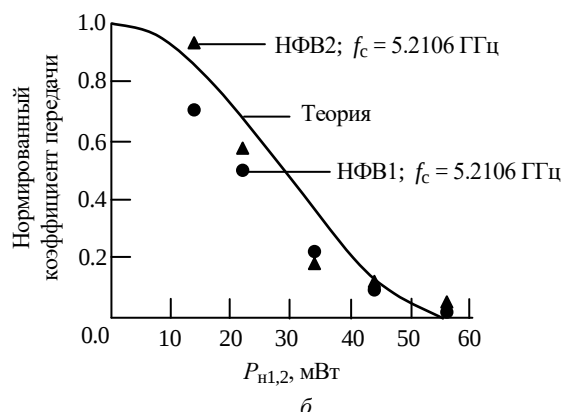
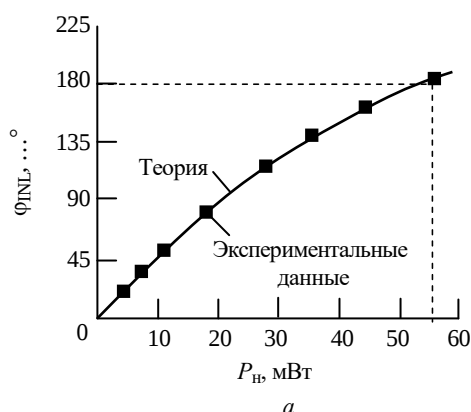


Рис. 6. Зависимости наведенного нелинейного сдвига фазы рабочего сигнала от мощности сигнала накачки в НФВ1 (а) и нормированного коэффициента передачи логического элемента от мощностей накачки, подававшихся на НФВ1 и НФВ2 (б)

Fig. 6. Induced nonlinear phase shift of the probe signal versus power of the pump signal in NPS1 (а) and the normalized transmission coefficient of the logic gate versus pump powers supplied to NPS1 and NPS2 (б)

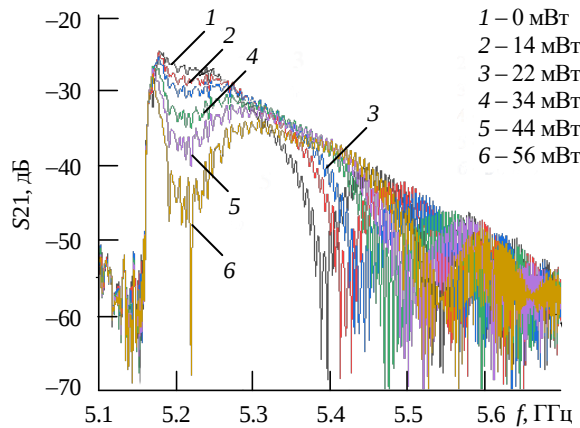


Рис. 7. Изменение АЧХ интерферометра в зависимости от значения мощности сигнала накачки, падающего на НФВ1

Fig. 7. Change in the frequency response of the interferometer depending on the incident on NPS1 power of the pump signal

ренция СВ изменяется на противофазную. Это приводит к уменьшению нормированного коэффициента передачи от 1 до 0 (рис. 6, б). Аналогичный эффект возникал в НФВ2.

Далее оба макета НФВ1 и НФВ2 подключались к схеме, изображенной на рис. 3. Проводились измерения АЧХ логического элемента в условиях воздействия сигналом накачки частотой $f_{H1} = 5.5$ ГГц на НФВ1 при $P_{H2} = 0$ мВт. Измерения проводились для нескольких значений мощности сигнала накачки. Измеренные зависимости представлены на рис. 7.

На предпоследнем этапе исследовалась АЧХ логического элемента в условиях воздействия сигналом накачки частотой $f_{H2} = f_{H1} = 5.5$ ГГц на НФВ2 при $P_{H1} = 0$ мВт. Отметим, что сигналы накачки брались от разных СВЧ-генераторов. Измеренные зависимости представлены на рис. 8. Видно, что при подаче сигнала накачки на НФВ2 в низкочастотной области АЧХ возникает подавление СВЧ-сигнала, как и в предыдущем случае.

На последнем этапе оба макета подключались к интерференционной схеме и проводились измерения логического элемента, выполняющего функцию "исключающее ИЛИ-НЕ". Принцип действия элемента заключается в следующем. В отсутствие управляющих сигналов накачки потери входного рабочего сигнала сравнительно низкие и составляют около 30 дБ (кривая 3 на рис. 9). Если на один из НФВ подается сигнал накачки частотой $f_{H1,2} = 5.5$ ГГц

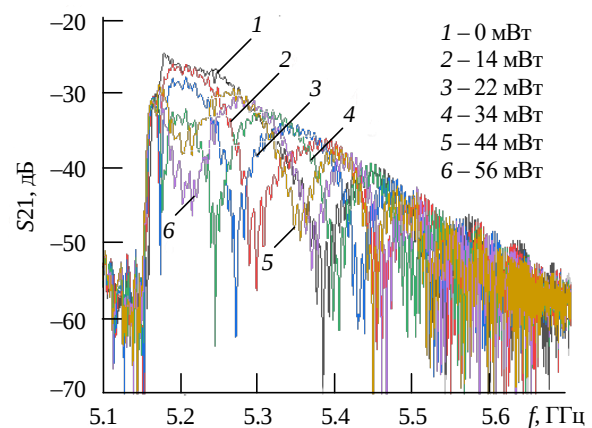


Рис. 8. Изменение АЧХ интерферометра в зависимости от значения мощности сигнала накачки, падающего на НФВ2

Fig. 8. Change in the frequency response of the interferometer depending on the incident on NPS2 power of the pump signal

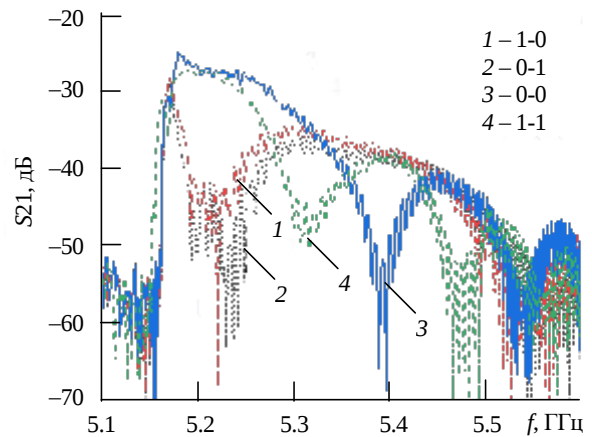


Рис. 9. Экспериментальная демонстрация работы логического элемента, выполняющего функцию "исключающее ИЛИ-НЕ"

Fig. 9. Experimental demonstration of the operation of the XNOR logic gate

и мощностью около 56 мВт, выходной сигнал устройства заметно ослабляется. Вносимые потери возрастают до 45 дБ (кривые 1 и 2 на рис. 9). При одновременной подаче сигналов накачки с частотами $f_{H1} = f_{H2} = 5.5$ ГГц на оба НФВ уровень ослабления уменьшается и опять приближается к 30 дБ (кривая 4 на рис. 9). Таким образом, результаты показывают, что в низкочастотной области АЧХ устройства реализуется логическая функция "исключающее ИЛИ-НЕ".

Заключение. Проведено численное моделирование характеристик спин-волнового логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ", построенных по схеме интерферометра Маха-Цендера. Показано, что логическая функция выполняется за счет эффекта наведенного нелинейного сдвига

фазы СВ в нелинейных фазовращателях, расположенных в разных плечах логического элемента.

Проведено экспериментальное исследование наведенного нелинейного сдвига фазы рабочих сигналов, падающих на идентичные нелинейные спин-волновые фазовращатели, расположенные в плечах логического элемента. Показано, что с ростом мощности сигнала накачки, подающегося на НФВ, до 60 мВт происходит наведенный нелинейный сдвиг фазы рабочего сигнала более, чем на 180° , что обуславливает возможность использования НФВ для построения спин-волновых логических элементов.

Экспериментально исследован принцип действия магنونного логического элемента. Показано, что в низкочастотной части АЧХ устройства реализуется логическая функция "исключающее ИЛИ-НЕ". В отсутствие управляющих сигналов накачки потери входного рабочего сигнала сравнительно низкие, а при подаче на один из НФВ сигнала накачки определенной мощности выходной сигнал устройства значительно ослабляется. При одновременной подаче сигналов накачки на оба НФВ уровень ослабления остается сравнительно низким.

Авторский вклад

Гапончик Роман Валерьевич – подготовка статьи; проведение моделирования и экспериментальных исследований.

Таценко Иван Юрьевич – сборка и подготовка измерительных стендов; настройка измерительного оборудования.

Витко Виталий Валерьевич – подготовка программ для моделирования характеристик НФВ.

Сташкевич Андрей Александрович – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обсуждение результатов.

Гото Таичи – анализ литературы по теме исследования; обсуждение результатов.

Устинов Алексей Борисович – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Author's contribution

Roman V. Haponchyk, preparation of the paper text; carrying out modeling and experimental studies.

Ivan Yu. Tatsenko, assembly and servicing of measuring setups.

Vitalii V. Vitko, carrying out numerical modeling of the NFS.

Andrey A. Stashkevich, literature review; development of research methods; discussion of the results.

Taichi Goto, literature review; discussion of the results.

Alexey B. Ustinov, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

Список литературы

1. Nikitov S. A., Tailhades P., Tsai C. S. Spin waves in periodic magnetic structures – magnonic crystals // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2001. Vol. 236, № 3. P. 320–330. doi: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X

2. Магноники – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / С. А. Никитов, Д. В. Калябин, И. В. Лисенков, А. Н. Славин, Ю. Н. Барабаненков, С. А. Осокин, А. В. Садовников, Е. Н. Бегинин, М. А. Морозова, Ю. П. Шараевский, Ю. А. Филимонов, Ю. В. Хивинцев, С. Л. Высоцкий, В. К. Сахаров, Е. С. Павлов // Успехи физ. наук. 2015. Т. 185, № 10. С. 1099–1128. doi: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099

3. Вороненко А. В., Герус С. В. Взаимодействие поверхностных магнитостатических волн с пространственно-периодическим магнитным полем // Письма в Журн. техн. физики. 1984. Т. 10, № 12. С. 746–748.

4. Kolodin P. A., Hillebrands B. Spin-wave propagation across periodically corrugated thin metallic ferromagnetic

films // J. of magnetism and magnetic materials. 1996. Vol. 161. P. 199–202. doi: 10.1016/S0304-8853(96)00019-4

5. Ferromagnetic films with magnon bandgap periodic structures: Magnon crystals / Yu. V. Gulyaev, S. A. Nikitov, L. V. Zhivotovskii, A. A. Klimov, Ph. Tailhades, L. Presmanes, C. Bonningue, C. S. Tsai, S. L. Vysotskii, Yu. A. Filimonov // J. of Experimental and Theoretical Physics Let. 2003. Vol. 77, № 10. P. 670–674. doi: 10.1134/1.1595698

6. Локк Э. Г. Дисперсия магнитостатических волн в композитной структуре феррит-решетка металлических полосок // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 12. С. 1484–1494.

7. Krawczyk M., Puzskarski H. Plane-wave theory of three-dimensional magnonic crystals // Physical Review B. 2008. Vol. 77, № 5. P. 054437. doi: 10.1103/PhysRevB.77.054437

8. Григорьева Н. Ю., Калиникос Б. А. Дисперсионные характеристики спиновых волн в планарных периодических структурах на основе ферро-

магнитных пленок // Журн. техн. физики. 2009. Т. 79, № 8. С. 110–117.

9. Высоцкий С. Л., Никитов С. А., Новицкий Н. Н. Спектр и потери поверхностных магнитостатических волн в одномерном магнетонном кристалле // Журн. техн. физики. 2011. Т. 81, № 2. С. 150–152.

10. Spin-wave logical gates / M. P. Kostylev, A. A. Serga, T. Schneider, B. Leven, B. Hillebrands // Applied Physics Let. 2005. Vol. 87, № 15. P. 153501. doi: 10.1063/1.2089147

11. Fetisov Y. K., Patton C. E. Microwave bistability in a magnetostatic wave interferometer with external feedback // IEEE transactions on magnetics. 1999. Vol. 35, № 2. P. 1024–1036. doi: 10.1109/20.748850

12. Устинов А. Б., Григорьева Н. Ю., Калинин Б. А. Наблюдение солитонов огибающей спиновых волн в периодических магнитных пленочных структурах // Письма в журн. экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 88, № 1. С. 34–39. doi: 10.1134/S0021364008130079

13. Морозова М. А., Шараевский Ю. П., Шешукова С. Е. Механизмы формирования солитонов огибающей в периодических ферромагнитных структурах // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.

2010. Т. 18, № 5. С. 113–124. doi: 10.18500/0869-6632-2010-18-5-111-120

14. Self-generation of chaotic dissipative soliton trains in active ring resonator with 1-D magnonic crystal / S. V. Grishin, Yu. P. Sharaevskii, S. A. Nikitov, E. N. Beginin, S. E. Sheshukova // IEEE transactions on magnetics. 2011. Vol. 47, № 10. P. 3716–3719. doi: 10.1109/TMAG.2011.2158293

15. Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Multifunctional nonlinear magnonic devices for microwave signal processing // Applied Physics Let. 2010. Vol. 96, № 14. P. 142513. doi: 10.1063/1.3386540

16. Induced nonlinear phase shift of spin waves for magnonic logic circuits / A. B. Ustinov, N. A. Kuznetsov, R. V. Haponchik, E. Lahderanta, T. Goto, M. Inoue // Applied Physics Let. 2021. Vol. 119, № 19. P. 192405. doi: 10.1063/5.0074824

17. Haponchik R. V., Ustinov A. B. Nonlinear phase shifts induced by pumping spin waves in magnonic crystals // Applied Physics Let.. 2023. Vol. 122, № 21. P. 212401. doi: 10.1063/5.0153392

18. Fan-out enabled spin wave majority gate / A. Mahmoud, F. Vanderveken, C. Adelman, F. Ciubotaru, S. Hamdioui, S. Cotofana // Aip Advances. 2020, vol. 10, № 3. doi: 10.1063/1.5134690

Информация об авторах

Гапончик Роман Валерьевич – аспирант 4-го года по направлению "Радиофизика" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – магноника; радиофотоника; нелинейные волновые процессы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: ferumno33@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

Таценко Иван Юрьевич – аспирант 4-го года по направлению "Радиофизика" Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – радиофотоника; оптоэлектронные генераторы СВЧ.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Витко Виталий Валерьевич – кандидат физико-математических наук (2017), доцент (2020) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные волновые процессы для применения в радиофотонике.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vitaliy.vitko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8743-7528>

Сташкевич Андрей Александрович – доктор физико-математических наук (1995), заслуженный профессор Галилеевского института (Institut Galilée) Университета Сорбонна Париж Север (Лаборатория физико-химических свойств материалов LSPM). Автор более 100 научных публикаций. Сфера научных интересов – спинтроника; магноника; мандельштам-бриллюэновская спектроскопия; радиофотоника.

Адрес: Лаборатория физико-химических свойств материалов, LSPM – CNRS UPR3407, Ж. Б. Клемана авеню, д. 99, Вилльтанёз, 93 430, Франция

E-mail: stachkevitch@univ-paris13.fr

Таичи Гото – доктор философии в инженерии (2011), доцент (2022) Института электросвязи Университета Тохоку. Автор более 60 научных работ. Сфера научных интересов – магنونная логика; физика твердого тела; магнитооптика.

Исследование нелинейного логического элемента "исключающее ИЛИ-НЕ"

61

на основе наведенного нелинейного сдвига фазы спиновых волн

Investigation of a Nonlinear XNOR Logic Gate Based on an Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves

Адрес: Институт электросвязи Университета Тохоку, 2-1-1 Катахира, Аоба-ку, Сендай, 980-8577, префектура Мияги, Япония
E-mail: taichi.goto.a6@tohoku.ac.jp
<https://orcid.org/0000-0002-0621-8196>

Устинов Алексей Борисович – доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах; СВЧ-электроника; радиофотоника. Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ustinov_rus@yahoo.com
<http://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Nikitov S. A., Tailhades P., Tsai C. S. Spin Waves in Periodic Magnetic Structures – Magnonic Crystals. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001, vol. 236, no. 3, pp. 320–330. doi: 10.1016/S0304-8853(01)00470-X
2. Nikitov S. A., Kalyabin D. V., Lisenkov I. V., Slavin A. N., Barabanenkov Ju. N., Osokin S. A., Sadvonnikov A. V., Beginin E. N., Morozova M. A., Sharaevskii Ju. P., Filimonov Ju. A., Hivincev Ju. V., Vysockii S. L., Saharov V. K., Pavlov E. S. Magnonics: a New Research Area in Spintronics and Spin Wave Electronics. *Physics-Uspekhi*. 2015, vol. 185, no. 10, pp. 1099–1128. doi: 10.3367/UFNe.0185.201510m.1099 (In Russ.)
3. Voronenko A. V., Gerus S. V. Interaction of Surface Magnetostatic Waves with Spatial-Periodical Magnetic Fields. *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 1984, vol. 10, no. 12, pp. 746–748. (In Russ.)
4. Kolodin P. A., Hillebrands B. Spin-Wave Propagation across Periodically Corrugated Thin Metallic Ferromagnetic Films. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996, vol. 161, pp. 199–202. doi: 10.1016/S0304-8853(96)00019-4
5. Gulyaev Yu. V., Nikitov S. A., Zhivotovskii L. V., Klimov A. A., Tailhades Ph., Presmanes L., Bonningue C., Tsai C. S., Vysotskii S. L., Filimonov Yu. A. Ferromagnetic Films with Magnon Bandgap Periodic Structures: Magnon Crystals. *J. of Experimental and Theoretical Physics Let.* 2003, vol. 77, no. 10, pp. 670–674. doi: 10.1134/1.1595698
6. Lock E. H. Dispersion of Magnetostatic Waves in a Ferrite-Lattice Composite Structure of Metal Strips. *Radio Engineering and Electronics*. 2003, vol. 48, no. 12, pp. 1484–1494. (In Russ.)
7. Krawczyk M., Puzkarski H. Plane-Wave Theory of Three-Dimensional Magnonic Crystals. *Physical Review B*. 2008, vol. 77, no. 5, p. 054437. doi: 10.1103/PhysRevB.77.054437
8. Grigor'eva N. Ju., Kalinikos B. A. Dispersion Characteristics of Spin Waves in Planar Periodic Structures Based on Ferromagnetic Films. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2009, vol. 79, no. 8, pp. 110–117. (In Russ.)
9. Vysockii S. L., Nikitov S. A., Novickii N. N. Spectrum and Losses of Surface Magnetostatic Waves in a One-Dimensional Magnon Crystal. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2011, vol. 81, no. 2, pp. 150–152. (In Russ.)
10. Kostylev M. P., Serga A. A., Schneider T., Leven B., Hillebrands B. Spin-Wave Logical Gates. *Applied Physics Let.* 2005, vol. 87, no. 15, p. 153501. doi: 10.1063/1.2089147
11. Fetisov Y. K., Patton C. E. Microwave Bistability in a Magnetostatic Wave Interferometer with External Feedback. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1999, vol. 35, no. 2, pp. 1024–1036. doi: 10.1109/20.748850
12. Ustinov A. B., Grigor'eva N. Y., Kalinikos B. A. Observation of Spin-Wave Envelope Solitons in Periodic Magnetic Film Structures. *Pis' ma v Zhurnal Èksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 2008, vol. 88, no. 1, pp. 34–39. doi: 10.1134/S0021364008130079 (In Russ.)
13. Morozova M. A., Sharaevskii Ju. P., Sheshukova S. E. Mechanisms of Formation of Envelope Solitons in Periodic Ferromagnetic Structures. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineynaya dinamika*. 2010, vol. 18, no. 5, pp. 113–124. doi: 10.18500/0869-6632-2010-18-5-111-120 (In Russ.)
14. Grishin S. V., Sharaevskii Yu. P., Nikitov S. A., Beginin E. N., Sheshukova S. E. Self-Generation of Chaotic Dissipative Soliton Trains in Active Ring Resonator with 1-D Magnonic Crystal. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2011, vol. 47, no. 10, pp. 3716–3719. doi: 10.1109/TMAG.2011.2158293
15. Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Kalinikos B. A. Multifunctional Nonlinear Magnonic Devices for Microwave Signal Processing. *Applied Physics Let.* 2010, vol. 96, no. 14, p. 142513. doi: 10.1063/1.3386540
16. Ustinov A. B., Kuznetsov N. A., Haponchik R. V., Lahderanta E., Goto T., Inoue M. Induced Nonlinear Phase Shift of Spin Waves for Magnonic Logic Circuits. *Applied Physics Let.* 2021, vol. 119, no. 19, p. 192405. doi: 10.1063/5.0074824
17. Haponchik R. V., Ustinov A. B. Nonlinear Phase Shifts Induced by Pumping Spin Waves in Magnonic Crystals. *Applied Physics Let.* 2023, vol. 122, no. 21, p. 212401. doi: 10.1063/5.0153392
18. Mahmoud A., Vanderveken F., Adelmann C., Ciubotaru F., Hamdioui S., Cotozana S. Fan-Out Enabled Spin Wave Majority Gate. *Aip Advances*. 2020, vol. 10, no. 3. doi: 10.1063/1.5134690

Information about the authors

Roman V. Haponchyk, Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics; nonlinear dynamics; spin waves.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ferumno33@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

Ivan Yu. Tatsenko, Postgraduate student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: microwave photonics; optoelectronic oscillators.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Vitalii V. Vitko, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2017), Associate Professor (2020) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: linear and nonlinear wave dynamics for application in microwave photonics.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: vitaliy.vitko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8743-7528>

Andrey A. Stashkevich, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1994), Emeritus Professor (2020) of Physics, Institut Galilee, Université Sorbonne Paris Nord. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: spintronics; magnonics; Brillouin spectroscopy; radiophotonics.
Address: Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux- LSPM – CNRS UPR3407, 99, J. B. Clement Ave., Villetaneuse 93 430, France
E-mail: stashkevitch@univ-paris13.fr

Taichi Goto, Dr Sci. (Eng.) (2011), Associate Professor (2022) at the Institute of Electrical Communication, Tohoku University. The author of more than 60 scientific publications. Area of expertise: magnonics logic; solid state physics; magneto-optics.
Address: Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2-1-1, Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Miyagi Prefecture, Japan
E-mail: taichi.goto.a6@tohoku.ac.jp
<https://orcid.org/0000-0002-0621-8196>

Alexey B. Ustinov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2012), Associate Professor (2010) of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: linear and non-linear properties of magnetic oscillations and waves in ferromagnetic films and layered structures on their basis; microwave devices; microwave photonics.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ustinov_rus@yahoo.com
<http://orcid.org/0000-0002-7382-9210>
