

Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 5
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(5)

Научная статья
УДК 537.86

DOI: 10.18500/0869-6632-003006
EDN: TXDSAP

Перестраиваемая спин-волновая линия задержки на основе феррита и диоксида ванадия

А. А. Никитин[✉], А. Е. Комлев, А. А. Никитин, А. Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина), Россия

E-mail: ✉alalnikitin@etu.ru, a.e.komlev@gmail.com, and.a.nikitin@gmail.com, Ustinov_rus@yahoo.com

Поступила в редакцию 2.06.2022, принята к публикации 14.07.2022, опубликована 30.09.2022

Аннотация. Одним из ключевых элементов современной радиоэлектроники являются линии задержки, которые широко используются как для генерации СВЧ-сигналов, так и для их обработки. Спин-волновые линии задержки на основе эпитаксиальных ферритовых пленок обеспечивают высокие значения времени задержки и малые габариты. Обычно электронное управление временем задержки в таких линиях реализуется только путем изменения напряженности внешнего магнитного поля, что имеет ряд практических недостатков. Использование структур, состоящих из ферритовых пленок и материалов с фазовым переходом металл–диэлектрик, позволяет улучшить рабочие характеристики спин-волновых линий задержки, в частности, снизить их энергопотребление и повысить скорость управления временем задержки. **Цель.** Разработка перестраиваемой спин-волновой линии задержки на основе пленок феррита и диоксида ванадия, а также исследование ее рабочих характеристик. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились на сконструированном макете перестраиваемой линии задержки СВЧ-сигнала на основе пленок железитригидрического граната (ЖИГ) и диоксида ванадия (VO_2). Ферритовый волновод был изготовлен из эпитаксиальной пленки ЖИГ, выращенной на подложке из гадолиний-галлиевого граната. Пленка диоксида ванадия была сформирована на подложке из диоксида кремния методом реактивного магнетронного распыления на постоянном токе. СВЧ измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей R&S®ZVA40. **Результаты.** Показано, что в результате фазового перехода металл–диэлектрик, обусловленного нагревом пленки VO_2 , происходит перестройка дисперсионных характеристик поверхностных спиновых волн в исследуемой линии задержки. Такая перестройка сопровождается изменением групповой скорости рабочих волн, что обеспечивает возможность управления временем задержки. В частности, в работе представлена конструкция линии задержки длиной 5 мм, которая обеспечивает управление временем задержки СВЧ-сигнала в пределах от 130 до 150 нс на частоте 4.33 ГГц. **Заключение.** Экспериментально продемонстрирован принцип управления временем задержки с помощью фазового перехода металл–диэлектрик, происходящего в пленке VO_2 . В частности, для исследуемой структуры было установлено, что переход пленки VO_2 из непроводящего в проводящее состояние приводит к изменению времени задержки на 15%. Рассмотренные структуры могут быть использованы в различных приложениях, имеющих перспективные применения в области обработки СВЧ-сигналов.


Ключевые слова: спиновые волны, феррит, переход металл–диэлектрик, диоксид ванадия, СВЧ-устройства.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0015).


Для цитирования: Никитин А. А., Комлев А. Е., Никитин А. А., Устинов А. Б. Перестраиваемая спин-волновая линия задержки на основе феррита и диоксида ванадия // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 5. С. 605–616. DOI: 10.18500/0869-6632-003006. EDN: TXDSAP

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Tunable spin-wave delay line based on ferrite and vanadium dioxide

A. A. Nikitin , A. E. Komlev, A. A. Nikitin, A. B. Ustinov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russia

E-mail:  alalnikitin@etu.ru, a.e.komlev@gmail.com,

and.a.nikitin@gmail.com, Ustinov_rus@yahoo.com

Received 2.06.2022, accepted 14.07.2022, published 30.09.2022

Abstract. One of the key elements for modern microwave circuits is a delay line, which is widely utilized for the signal generation as well as processing. Spin-wave delay lines based on ferrite films provide a high delay time and small dimensions. Typically, the performance characteristics of such lines are tuned by the variation of an externally applied magnetic field characterized by some drawbacks. The phenomenon of a metal–insulator transition (MIT) in the phase change materials permits to improve the performance characteristics of the spin-wave delay lines. In particular, this concept allows to reduce the power consumption and improve the control speed of a delay time. *Aim.* Development of a tunable spin-wave delay line based on ferrite and vanadium dioxide films, as well as the study of its performance characteristics. *Methods.* Experimental investigations were carried out for the delay line composed of the yttrium iron garnet (YIG) and vanadium dioxide (VO₂) films. The ferrite waveguide was fabricated from a single-crystal YIG film grown on a gallium gadolinium garnet substrate. A vanadium dioxide film was formed on a silicon dioxide substrate by DC reactive magnetron sputtering. The microwave measurements were carried out using the vector network analyzer R&S®ZVA40. *Results.* It was shown that heating of the VO₂ film induces a sufficient drop of its resistance that causes the transformation of the spin-wave dispersion characteristic. This leads to the decrease in the group velocity of the propagating waves providing a growth of a delay time. Namely, experimental structure of 5-mm length offers a tunable time delay range from 130 up to 150 ns at the operating frequency of 4.33 GHz. *Conclusion.* A proof-of-principle for the MIT control of the delay time composed on the YIG-VO₂ structure has been presented. It was shown that a switch of VO₂ film from the isolating into conducting state produces a 15% change in the delay time. The considered microwave delay lines look favorable for applications as a complimentary part to the traditional approach for general computing and microwave signal processing.

Keywords: spin waves, ferrites, metal–insulator transition, vanadium dioxide, microwave devices.

Acknowledgements. This work was supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation (Project “Goszadanie”) grant No. 075-01024-21-02 by 29.09.2021 (Project FSEE-2021-0015).

For citation: Nikitin AA, Komlev AE, Nikitin AA, Ustinov AB. Tunable spin-wave delay line based on ferrite and vanadium dioxide. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2022;30(5):605–616. DOI: 10.18500/0869-6632-003006

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Одним из ключевых элементов современной радиоэлектроники являются линии задержки (ЛЗ), которые широко используются как для генерации СВЧ-сигналов, так и для их обработки. Особенностью аналоговых линий задержки является плавное изменение времени задержки сигналов, амплитуда которых непрерывно изменяется. В результате активного развития техники и технологии такие СВЧ-устройства были разработаны с использованием волн различной природы, среди которых наибольшее распространение получили оптические, магнитные и акустические волны [1]. Опволоконные линии задержки среди различных конструкций демонстрируют значительно более широкую рабочую полосу и более высокое быстродействие, что является важным параметром для сверхширокополосных систем. Основным недостатком, ограничивающим применение таких устройств, являются габариты. По сравнению с перечисленными выше спин-волновые (СВ) линии задержки на основе эпитаксиальных ферритовых пленок обеспечивают значительно большее погонное время задержки, следовательно, меньшие габариты [2]. Групповая скорость СВ меньше

скорости света на 4–7 порядков в зависимости от толщины ферритовой пленки и ее магнитных свойств. Например, для прохождения расстояния 1 мм в пленке железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной 4 мкм, спиновой волне требуется такое же время, как и свету для прохождения расстояния 100 м в оптическом волокне. Более того, благодаря появлению новых методов получения пленок ЖИГ субмикронной толщины [3–5], такое же время задержки может быть получено для микронных или даже субмикронных расстояний распространения спиновых волн. Таким образом, спин-волновые линии задержки на пленке ЖИГ представляют собой сверхкомпактные линии задержки (ЛЗ), технология которых совместима с технологией изготовления СВЧ гибридных интегральных схем.

Другой ключевой особенностью распространения спиновых волн в эпитаксиальных пленках ЖИГ является разнообразие их дисперсионных характеристик. Эта особенность позволяет проектировать и создавать линии задержки различных типов [2, 6]. Дисперсионные линии задержки с линейной зависимостью времени задержки от частоты реализуются в ферритовых пленках, включающих металлический слой [7, 8]. Бездисперсионные линии задержки состоят из экранированных с обеих сторон ферритовых пленок либо из комбинации двух последовательно соединенных линий задержки [9, 10]. Общая идея большинства перечисленных работ основана на влиянии идеально проводящих слоев на распространение спиновых волн [11]. Исключением является работа [12], в которой исследовалось влияние конечной проводимости на спектр спиновых волн. Однако электронное управление временем задержки в таких линиях реализуется только путем изменения напряженности внешнего магнитного поля, используемого для намагничивания волноведущей структуры. Данный способ перестройки имеет такие недостатки, как относительно низкая скорость перестройки (порядка единиц микросекунд), значительное электропотребление, а также большие габариты.

Для преодоления перечисленных недостатков было предложено использовать композиционные материалы с разнесенными в разные слои, но взаимодействующими между собой, сегнетоэлектрической/пьезоэлектрической и ферромагнитной фазами [13–15]. Высокая практическая значимость таких гибридных структур, известных как искусственные мультиферроики, обусловлена возможностью создания устройств, сочетающих в себе преимущества миниатюрных спин-волновых элементов с возможностью двойного электронного управления их СВЧ-характеристиками. К примеру, в работе [16] была разработана управляемая ЛЗ, состоящая из пленки ЖИГ и магнитообата-титаната свинца. Принцип работы такого устройства основан на магнитоэлектрическом взаимодействии в феррит-пьезоэлектрической структуре, которое обеспечивает электрически индуцированную задержку СВЧ-сигнала на рабочей частоте. Отметим, что недостатком подобных структур является необходимость использования относительно толстых (более 100 мкм) пьезоэлектрических слоев. В результате для эффективного управления необходимо использовать высокое управляющее напряжение (до 500 В), что ограничивает возможность применения таких линий задержки. Таким образом, актуальной задачей является разработка альтернативных способов управления дисперсией спиновых волн. Одним из возможных способов решения данной задачи является использование структур, состоящих из ферритовых пленок и материалов с фазовым переходом металл–диэлектрик.

Среди различных сред, в которых реализуется фазовый переход металл–диэлектрик, диоксид ванадия (VO_2) является одним из наиболее перспективных материалов для практического применения [17]. В частности, диоксид ванадия активно используется в полевых транзисторах [18], устройствах памяти и нейроморфных вычислениях [19], спинтронных системах [20]. Такой большой научный интерес обусловлен уникальным физическим свойством VO_2 , а именно резким изменением его проводимости вблизи температуры фазового перехода (около 340 К).

Более того, такой переход характеризуется высокой скоростью переключения (от пикосекунд до наносекунд) под воздействием различных факторов: термического [21], электрического [22], оптического [23] или под действием деформации [24].

В наших теоретических работах [25], [26] было исследовано влияние фазового перехода металл–диэлектрик на спектр спиновых волн в слоистых структурах феррит – диоксид ванадия. Позднее в работе [27] была экспериментально показана возможность управления групповой скоростью спиновых волн в пленках ЖИГ путем изменения проводимости пленки VO₂. В настоящей работе фазовый переход металл–диэлектрик используется для создания нового типа СВЧ спин-волновой линии задержки, состоящей из пленок феррита и диоксида ванадия. Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе были изготовлены пленки VO₂ и ЖИГ, а также проведен анализ их физических свойств. На втором этапе был спроектирован и изготовлен прототип линии задержки. На заключительном этапе были исследованы рабочие характеристики линии задержки.

1. Исследование свойств пленок VO₂ и ЖИГ

Пленка диоксида ванадия толщиной 0.55 мкм была нанесена на подложку из диоксида кремния (SiO₂) толщиной 500 мкм методом реактивного магнетронного распыления на постоянном токе. Образец имел размеры в плоскости (4 × 4) мм². Для изучения электрических свойств осажденной пленки были измерены зависимости сопротивления VO₂ от температуры. Измерения проводились в зондовой станции с помощью источника-измерителя Keithley 2635A. Экспериментальные результаты, полученные в режимах нагрева и охлаждения, показаны на рис. 1 красными треугольниками и синими квадратами, соответственно.

Как видно из рис. 1, образец VO₂ демонстрирует фазовый переход металл–диэлектрик при температуре $T \sim 340$ К. При этом пленка VO₂ находится в диэлектрическом состоянии при T ниже 334 К, а в проводящем состоянии – при T выше 345 К. Таким образом, изменение температуры в узком диапазоне от 334 до 345 К приводит к резкому падению сопротивления от 143 кОм до 75 Ом.

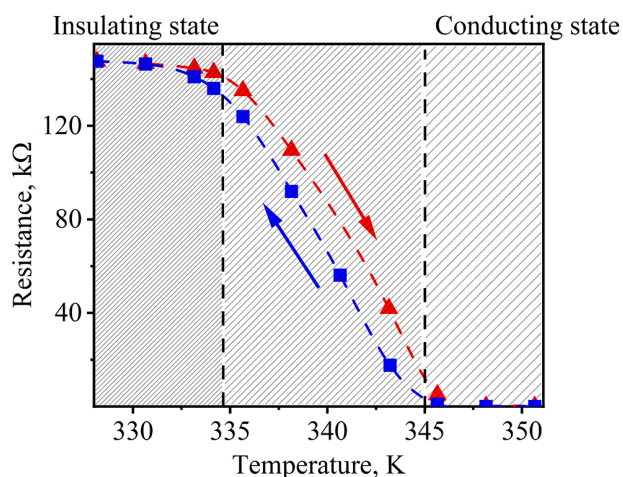


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления пленки VO₂
 Fig. 1. Temperature dependences of the VO₂ resistance

характеризуются схожим поведением, смещенным на 3 К, что свидетельствует о небольших стехиометрических отклонениях в исследуемой пленке VO₂ [28].

На следующем этапе работы был изготовлен ферритовый волновод. В эксперименте использовалась эпитаксиальная пленка ЖИГ, выращенная на подложке из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. Длина, ширина и толщина пленки равнялись 3 см, 2 мм и 5.7 мкм, соответственно, а ее намагниченность насыщения была равной $4\pi M_s = 1900$ Гс при комнатной температуре. Полуширина кривой ферромагнитного резонанса пленок ЖИГ, измеренная на частоте 5 ГГц, составляла 0.5 Э.

2. Экспериментальный макет линии задержки на пленках VO₂ и ЖИГ

Экспериментальный макет ЛЗ в продольном сечении показан на рис. 2. Исследуемая линия задержки состояла из пленки ЖИГ на подложке ГГГ, тонкого слоя VO₂ и микрополосковых антенн, предназначенных для возбуждения и приема СВ.

Следует сделать несколько комментариев по поводу конструкции линии задержки. Во-первых, короткозамкнутые входная и выходная микрополосковые антенны длиной 2.5 мм и шириной 50 мкм располагались на равных расстояниях от обоих концов ферритовой пленки на расстоянии 5 мм друг от друга. Исследуемая структура помещалась между полюсами электромагнита в однородное постоянное магнитное поле напряженностью 855 Э. Поле было направлено в плоскости ферритовой пленки параллельно антеннам, что обеспечивало возбуждение и распространение поверхностных спиновых волн в структуре.

Во-вторых, термическое переключение пленки VO₂, находящейся в контакте с ЖИГ, в проводящее состояние приводит к значительному снижению намагниченности насыщения феррита, что вызывает частотный сдвиг передаточных характеристик слоистой структуры. Для предотвращения термического воздействия пленка VO₂ располагалась на противоположной стороне подложки ГГГ. Это обеспечивало термическую изоляцию пленок VO₂ и ЖИГ. Толщина ГГГ выбиралась таким образом, чтобы сохранить возможность эффективного управления динамикой СВ с помощью фазового перехода металл–диэлектрик, но предотвратить тепловое воздействие на пленку ЖИГ. В ходе исследований было установлено, что уменьшение толщины подложки ГГГ с 500 мкм до 100 мкм обеспечивает сохранение эффективности управления временем задержки в исследуемой структуре и предотвращает тепловое воздействие на пленку ЖИГ. Кроме того, пленка ЖИГ дополнительно термостатировалась при температуре 331 К. Это обеспечивало устойчивость магнитных свойств пленки ЖИГ при нагреве пленки диоксида ванадия от $T = 331$ К до $T = 346$ К.

Далее рассмотрим принцип распространения поверхностной СВ через исследуемую линию задержки. Первоначально спиновая волна возбуждается входной микрополосковой антенной и распространяется в пленке ЖИГ. На границе, на которой подложка ГГГ находится в контакте с пленкой диоксида ванадия, дисперсия поверхностной СВ модифицируется в соответствии с изменением сопротивления VO₂. Волна проходит через слоистую структуру и принимается выходной микрополосковой антенной, расположенной на поверхности пленки ЖИГ. Подача СВЧ-мощности к антеннам и ее отвод осуществлялись микрополосковыми линиями с волновым сопротивлением 50 Ом. Эти антенны были подключены к векторному анализатору цепей R&S®ZVA40 для измерений в непрерывном режиме.

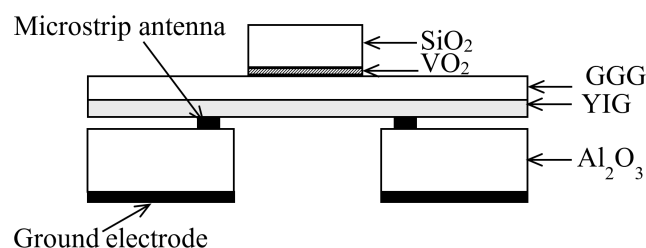


Рис. 2. Линия задержки, состоящая из пленки ЖИГ на подложке гадолиний-галлиевого граната и пленки VO₂ на подложке SiO₂

Fig. 2. Sketch of the delay line composed of the YIG film on the gadolinium gallium garnet substrate and the VO₂ film on the SiO₂ substrate

3. Исследование передаточных характеристик линии задержки на пленках VO₂ и ЖИГ

В данном разделе приводятся экспериментальные исследования линии задержки, содержащей пленки ЖИГ и VO₂. Групповое время задержки и коэффициент передачи по мощности измерялись с помощью векторного анализатора цепей. Полученные результаты представлены на рис. 3. Для уточнения динамики спиновых волн в предложенной структуре измерения проводились как для диэлектрического (высокоомного), так и для проводящего (низкоомного) состояния пленки VO₂ при температурах 331 К и 346 К, соответственно.

Первоначально было проведено исследование спин-волновой линии задержки при температуре 331 К. Результаты измерений передаточных характеристик и времени задержки показаны на рис. 3, *a, c* черными линиями. Как видно из рис. 3, *a*, передаточная характеристика линии задержки описывается плавным увеличением вносимых потерь с 9 до 50 дБ в полосе частот от 4.17 до 4.64 ГГц. При этом зависимость времени задержки от рабочей частоты, показанная на рис. 3, *c*,

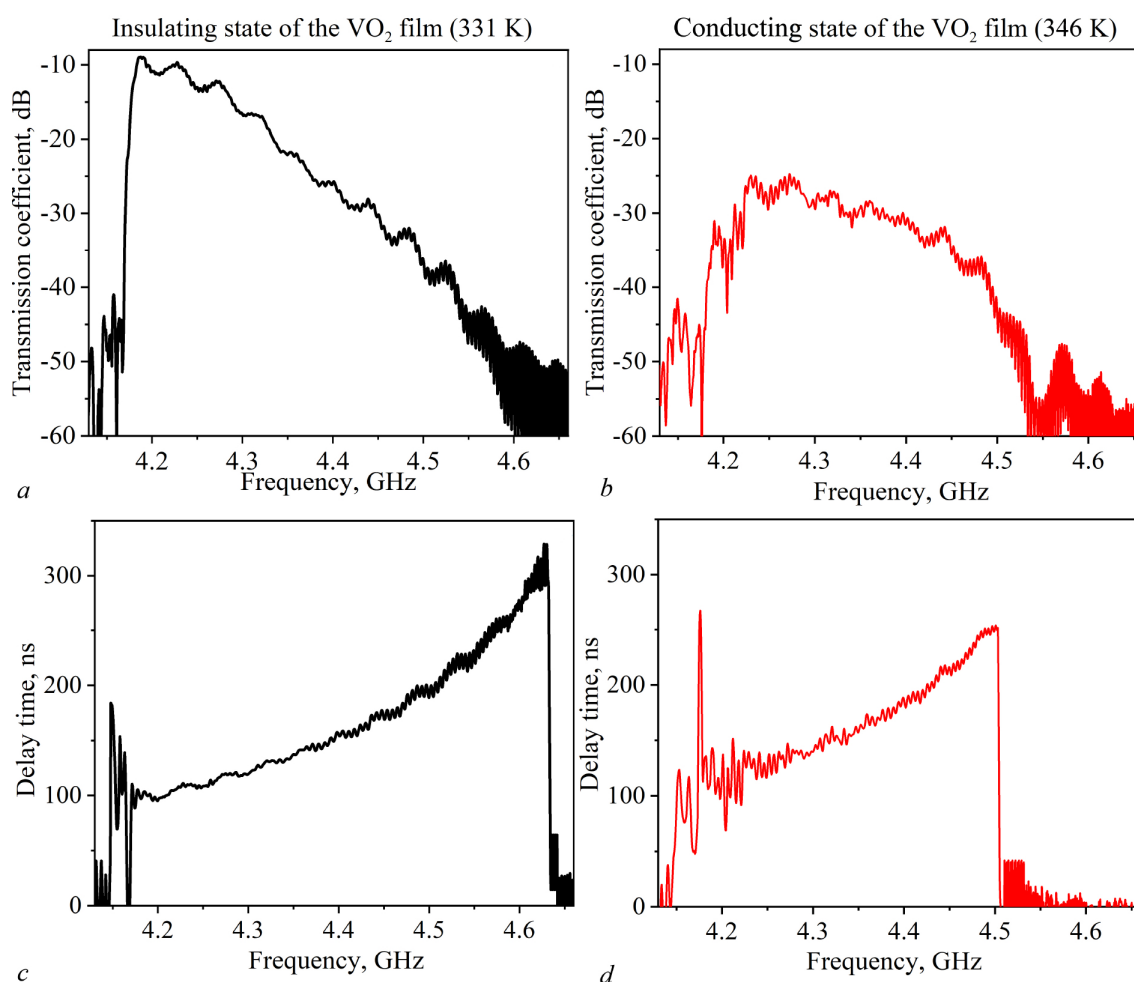


Рис. 3. Частотные зависимости вносимых потерь (*a, b*) и времени задержки (*c, d*) спиновых волн в исследуемой структуре с пленкой VO₂ в диэлектрическом (*a, c*) или проводящем (*b, d*) состоянии

Fig. 3. Frequency dependences of the insertion loss (*a, b*) and the delay time (*c, d*) accumulated by the spin waves in the designed structure with the VO₂ film exhibiting insulating (*a, c*) or conducting (*b, d*) state

определяется законом дисперсии рабочих спиновых волн и имеет нелинейную зависимость, которую можно разделить на две условные области. В первой частотной области (4.17...4.47 ГГц) время задержки возрастает практически линейно от 100 до 180 нс, обеспечивая дисперсию групповой задержки $D = d^2\varphi/d\omega^2 = 46 \text{ нс}^2/\text{рад}$. Во второй частотной области (4.47...4.64 ГГц) время задержки характеризуется более резким нарастанием от 180 до 325 нс при $D = 127 \text{ нс}^2/\text{рад}$. Частотные зависимости, показанные на рис. 3, *a*, *c*, характерны для спин-волновой линии задержки, состоящей только из ферритовой пленки. Это свидетельствует о том, что пленка диоксида ванадия в диэлектрическом состоянии не оказывает влияния на распространение спиновых волн в исследуемой волноведущей структуре в рабочем диапазоне частот.

Перейдем теперь к анализу передаточных характеристик и времени задержки для исследуемой структуры в случае, когда пленка VO_2 находится в проводящем состоянии при $T = 346 \text{ К}$. Данные зависимости показаны на рис. 3, *b*, *d* красными линиями. Как видно из сравнения рис. 3, *a* и рис. 3, *b*, фазовый переход металл–диэлектрик в пленке VO_2 оказывает существенное влияние на коэффициент передачи спин-волновой линии задержки. При этом частота отсечки СВ $f = 4.17 \text{ ГГц}$ не изменяется, что обусловлено конструкцией ЛЗ, в которой температура пленки ЖИГ поддерживается 331 К. Как видно на рис. 3, *b*, *d*, уменьшение сопротивления VO_2 приводит к снижению групповой скорости спиновых волн, что вызывает увеличение времени задержки и потерь на распространение, а также приводит к сужению полосы пропускания до 310 МГц. Такой диапазон частот обусловлен наличием промежуточного слоя ГГГ. Как было показано в нашей предыдущей работе [26], увеличение толщины промежуточного диэлектрического слоя между ЖИГ и VO_2 в проводящем состоянии сужает частотный диапазон, в котором групповая скорость СВ в слоистой структуре и свободной ферритовой пленке различаются. Неравномерность на рис. 3, *b*, близкая к частоте отсечки поверхностных СВ, объясняется наличием дополнительных источников потерь, связанных с рассогласованием волновых сопротивлений. Отметим, что для уменьшения уровня вносимых потерь, а также для расширения рабочего диапазона частот необходимо увеличение проводимости пленки VO_2 в металлическом состоянии, а также увеличение ее толщины [12, 26].

Рассмотрим теперь зависимость времени задержки от частоты, представленную на рис. 3, *d*. В результате нагрева пленки VO_2 ширина полосы передаточной характеристики сужается, что приводит к формированию практически линейной области, для которой дисперсия групповой задержки имеет величину порядка $D = 60 \text{ нс}^2/\text{рад}$. При этом наиболее примечательной особенностью предложенной линии задержки является увеличение времени задержки на 15% (с 130 до 150 нс на частоте 4.33 ГГц) в полосе пропускания СВЧ-сигнала около 250 МГц. Такой диапазон перестройки реализуется за счет управляемого изменения сопротивления VO_2 , что оказывает существенное влияние на групповую скорость СВ.

Заключение

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования СВЧ-свойств линии задержки, состоящей из пленок диоксида ванадия и железиттриевого граната. Продемонстрирован принцип управления временем задержки с помощью фазового перехода металл–диэлектрик, происходящего в пленке VO_2 . В частности, для исследуемой структуры было установлено, что переход пленки VO_2 из непроводящего в проводящее состояние приводит к изменению времени задержки на 15%. Рассмотренные структуры могут быть использованы в различных приложениях, имеющих перспективные применения в области обработки СВЧ-сигналов. Кроме того, такие линии задержки могут применяться в такой новой области, как нейроморфные вычисления на

принципах магноники [29, 30]. Большое время задержки и сильная нелинейность, которыми обладают спиновые волны, позволяют реализовать искусственную нейронную сеть с нелинейным отображением данных в пространство большей размерности [31]. Такой подход позволяет реализовать резервуарные вычисления, которые представляет собой один из основных методов обработки информации в областях машинного обучения и искусственного интеллекта.

Список литературы

1. *Shahoei H., Yao J.* Delay lines // In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2014. P. 1–15. DOI: 10.1002/047134608X.W8234.
2. *Ishak W. S.* Magnetostatic wave technology: a review // Proc. IEEE. 1988. Vol. 76, no. 2. P. 171–187. DOI: 10.1109/5.4393.
3. *d'Allivy Kelly O., Anane A., Bernard R., Ben Youssef J., Hahn C., Molpeceres A. H., Carrétéro C., Jacquet E., Deranlot C., Bortolotti P., Lebourgeois R., Mage J.-C., de Loubens G., Klein O., Cros V., Fert A.* Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, no. 8. P. 082408. DOI: 10.1063/1.4819157.
4. *Costa J. D., Figeys B., Sun X., Van Hoovels N., Tilmans H. A., Ciubotaru F., Adelman C.* Compact tunable YIG-based RF resonators // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118, no. 16. P. 162406. DOI: 10.1063/5.0044993.
5. *Lammel M., Scheffler D., Pohl D., Swekis P., Reitzig S., Piontek S., Reichlova H., Schlitz R., Geishendorf K., Siegl L., Rellinghaus B., Eng L. M., Nielsch K., Goennenwein S. T. B., Thomas A.* Atomic layer deposition of yttrium iron garnet thin films // Phys. Rev. Mater. 2022. Vol. 6, no. 4. P. 044411. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.044411.
6. *Adam J. D.* Analog signal processing with microwave magnetics // Proc. IEEE. 1988. Vol. 76, no. 2. P. 159–170. DOI: 10.1109/5.4392.
7. *Adam J. D., Daniel M. R., Okeeffe T. W.* Magnetostatic wave devices // Microw. J. 1982. Vol. 25. P. 95–99.
8. *Chang K. W., Owens J. M., Carter R. L.* Linearly dispersive time-delay control of magnetostatic surface wave by variable ground-plane spacing // Electron. Lett. 1983. Vol. 19, no. 14. P. 546–547. DOI: 10.1049/el:19830370.
9. *Ustinov A. B., Demidov V. E., Kalinikos B. A.* Electronically tunable nondispersive magnetostatic wave delay line // Electron. Lett. 2001. Vol. 37, no. 19. P. 1161–1162. DOI: 10.1049/el:20010809.
10. *Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Кожевников А. В., Никитов С. А., Романов А. В., Филимонов Ю. А.* Бездисперсионная линия задержки на магнитостатических волнах // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 15. С. 45–50.
11. *Kaboš P., Stalmachov V. S.* Magnetostatic Waves and Their Application. Dordrecht: Springer, 1994. 303 p. DOI: 10.1007/978-94-011-1246-8.
12. *Веселов А. Г., Высоцкий С. Л., Казаков Г. Т., Сухарев А. Г., Филимонов Ю. А.* Поверхностные магнитостатические волны в металлизированных пленках ЖИГ // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 12. С. 2067–2074.
13. *Vopson M. M.* Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications // Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2015. Vol. 40, no. 4. P. 223–250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584.
14. *Palneedi H., Annapureddy V., Priya S., Ryu J.* Status and perspectives of multiferroic magneto-electric composite materials and applications // Actuators. 2016. Vol. 5, no. 1. P. 9. DOI: 10.3390/act5010009.
15. *Ustinov A. B., Drozdovskii A. V., Nikitin A. A., Semenov A. A., Bozhko D. A., Serga A. A., Hillebrands B., Lähderanta E., Kalinikos B. A.* Dynamic electromagnonic crystal based on artificial multiferroic heterostructure // Commun. Phys. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 137. DOI: 10.1038/s42005-019-0240-7.
16. *Fetisov Y. K., Srinivasan G.* Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 87, no. 10. P. 103502. DOI: 10.1063/1.2037860.

17. Shi R., Shen N., Wang J., Wang W., Amini A., Wang N., Cheng C. Recent advances in fabrication strategies, phase transition modulation, and advanced applications of vanadium dioxide // *Appl. Phys. Rev.* 2019. Vol. 6, no. 1. P. 011312. DOI: 10.1063/1.5087864.
18. Ruzmetov D., Gopalakrishnan G., Ko C., Narayanamurti V., Ramanathan S. Three-terminal field effect devices utilizing thin film vanadium oxide as the channel layer // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 107, no. 11. P. 114516. DOI: 10.1063/1.3408899.
19. Zhou Y., Ramanathan S. Mott memory and neuromorphic devices // *Proc. IEEE.* 2015. Vol. 103, no. 8. P. 1289–1310. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2431914.
20. Safi T. S., Zhang P., Fan Y., Guo Z., Han J., Rosenberg E. R., Ross C., Tserkovnyak Y., Liu L. Variable spin-charge conversion across metal-insulator transition // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11, no. 1. P. 476. DOI: 10.1038/s41467-020-14388-9.
21. Morin F. J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature // *Phys. Rev. Lett.* 1959. Vol. 3, no. 1. P. 34–36. DOI: 10.1103/PhysRevLett.3.34.
22. Andreeva N. V., Turalchuk P. A., Chigirev D. A., Vendik I. B., Ryndin E. A., Luchinin V. V. Electron impact processes in voltage-controlled phase transition in vanadium dioxide thin films // *Chaos, Solitons & Fractals.* 2021. Vol. 142. P. 110503. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110503.
23. Cavalleri A., Tóth C., Siders C. W., Squier J. A., Ráksi F., Forget P., Kieffer J. C. Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 87, no. 23. P. 237401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.237401.
24. Kikuzuki T., Lippmaa M. Characterizing a strain-driven phase transition in VO₂ // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, no. 13. P. 132107. DOI: 10.1063/1.3380599.
25. Nikitin A. A., Vitko V. V., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Karzin V. V., Komlev A. E., Kalinikos B. A., Lähderanta E. Spin-wave phase shifters utilizing metal-insulator transition // *IEEE Magn. Lett.* 2018. Vol. 9. P. 3706905. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2874172.
26. Nikitin A. A., Vitko V. V., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Microwave tunable devices on the YIG-VO₂ structures // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. Vol. 1400, no. 4. P. 044001. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/4/044001.
27. Nikitin A. A., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Komlev A. E., Lähderanta E., Kalinikos B. A. Metal-insulator switching of vanadium dioxide for controlling spin-wave dynamics in magnonic crystals // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 128, no. 18. P. 183902. DOI: 10.1063/5.0027792.
28. Cuffe S., John J., Zhang Z., Parra J., Sun J., Orobtcouk R., Ramanathan S., Sanchis P. VO₂ nanophotonics // *APL Photonics.* 2020. Vol. 5, no. 11. P. 110901. DOI: 10.1063/5.0028093.
29. Watt S., Kostylev M., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Implementing a magnonic reservoir computer model based on time-delay multiplexing // *Phys. Rev. Appl.* 2021. Vol. 15, no. 6. P. 064060. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064060.
30. Nikitin A. A., Nikitin A. A., Ustinov A. B., Watt S., Kostylev M. P. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing // *J. Appl. Phys.* 2022. Vol. 131, no. 11. P. 113903. DOI: 10.1063/5.0081142.
31. Chumak A. V., Kabos P., Wu M., Abert C., Adelman C., Adeyeye A. O., Åkerman J., Aliev F. G., Anane A., Awad A., Back C. H., Barman A., Bauer G. E. W., Becherer M., Beginin E. N., Bittencourt V. A. S. V., Blanter Y. M., Bortolotti P., Boventer I., Bozhko D. A., Bunyaev S. A., Carmiggelt J. J., Cheenikundil R. R., Ciubotaru F., Cotofana S., Csaba G., Dobrovolskiy O. V., Dubs C., Elyasi M., Fripp K. G., Fulara H., Golovchanskiy I. A., Gonzalez-Ballester C., Graczyk P., Grundler D., Gruszecki P., Gubbiotti G., Guslienko K., Haldar A., Hamdioui S., Hertel R., Hillebrands B., Hioki T., Houshang A., Hu C.-M., Huebl H., Huth M., Iacocca E., Jungfleisch M. B., Kakazei G. N., Khitun A., Khymyn R., Kikkawa T., Klaui M., Klein O., Klos J. W., Knauer S., Koraltan S., Kostylev M., Krawczyk M., Krivorotov I. N., Kruglyak V. V., Lachance-Quirion D., Ladak S., Lebrun R., Li Y., Lindner M., Macedo R., Mayr S., Melkov G. A., Mieszczak S.,

Nakamura Y., Nembach H. T., Nikitin A. A., Nikitov S. A., Novosad V., Otalora J. A., Otani Y., Papp A., Pigeau B., Pirro P., Porod W., Porrati F., Qin H., Rana B., Reimann T., Riente F., Romero-Isart O., Ross A., Sadovnikov A. V., Safin A. R., Saitoh E., Schmidt G., Schultheiss H., Schultheiss K., Serga A. A., Sharma S., Shaw J. M., Suess D., Surzhenko O., Szulc K., Taniguchi T., Urbanek M., Usami K., Ustinov A. B., van der Sar T., van Dijken S., Vasyuchka V. I., Verba R., Viola Kusminskiy S., Wang Q., Weides M., Weiler M., Wintz S., Wolski S. P., Zhang X. Advances in magnetics roadmap on spin-wave computing // IEEE Trans. Magn. 2022. Vol. 58, no. 6. P. 0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.

References

1. Shahoei H, Yao J. Delay lines. In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2014. P. 1–15. DOI: 10.1002/047134608X.W8234.
2. Ishak WS. Magnetostatic wave technology: a review. Proc. IEEE. 1988;76(2):171–187. DOI: 10.1109/5.4393.
3. d’Allivy Kelly O, Anane A, Bernard R, Ben Youssef J, Hahn C, Molpeceres AH, Carrétéro C, Jacquet E, Deranlot C, Bortolotti P, Lebourgeois R, Mage JC, de Loubens G, Klein O, Cros V, Fert A. Inverse spin Hall effect in nanometer-thick yttrium iron garnet/Pt system. Appl. Phys. Lett. 2013;103(8):082408. DOI: 10.1063/1.4819157.
4. Costa JD, Figeys B, Sun X, Van Hoovels N, Tilmans HA, Ciubotaru F, Adelmann C. Compact tunable YIG-based RF resonators. Appl. Phys. Lett. 2021;118(16):162406. DOI: 10.1063/5.0044993.
5. Lammel M, Scheffler D, Pohl D, Swekis P, Reitzig S, Piontek S, Reichlova H, Schlitz R, Geishendorf K, Siegl L, Rellinghaus B, Eng LM, Nielsch K, Goennenwein STB, Thomas A. Atomic layer deposition of yttrium iron garnet thin films. Phys. Rev. Mater. 2022;6(4):044411. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.6.044411.
6. Adam JD. Analog signal processing with microwave magnetics. Proc. IEEE. 1988;76(2):159–170. DOI: 10.1109/5.4392.
7. Adam JD, Daniel MR, Okeeffe TW. Magnetostatic wave devices. Microw. J. 1982;25:95–99.
8. Chang KW, Owens JM, Carter RL. Linearly dispersive time-delay control of magnetostatic surface wave by variable ground-plane spacing. Electron. Lett. 1983;19(14):546–547. 10.1049/el:19830370.
9. Ustinov AB, Demidov VE, Kalinikos BA. Electronically tunable nondispersive magnetostatic wave delay line. Electron. Lett. 2001;37(19):1161–1162. DOI: 10.1049/el:20010809.
10. Vysotskii SL, Kazakov GT, Kozhevnikov AV, Nikitov SA, Romanov AV, Filimonov YA. Nondispersive delay line on magnetostatic waves. Tech. Phys. Lett. 2006;32(8):667–669. DOI: 10.1134/S1063785006080098.
11. Kaboš P, Stalmachov VS. Magnetostatic Waves and Their Application. Dordrecht: Springer; 1994. 303 p. DOI: 10.1007/978-94-011-1246-8.
12. Veselov AG, Vysotskiy SL, Kazakov GT, Sukharev AG, Filimonov YA. Surface magnetostatic waves in metal-plated yttrium iron garnet films. J. Commun. Technol. Electron. 1994;39:102–107.
13. Vopson MM. Fundamentals of multiferroic materials and their possible applications. Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 2015;40(4):223–250. DOI: 10.1080/10408436.2014.992584.
14. Palneedi H, Annapureddy V, Priya S, Ryu J. Status and perspectives of multiferroic magnetoelectric composite materials and applications. Actuators. 2016;5(1):9. DOI: 10.3390/act5010009.
15. Ustinov AB, Drozdovskii AV, Nikitin AA, Semenov AA, Bozhko DA, Serga AA, Hillebrands B, Lähderanta E, Kalinikos BA. Dynamic electromagnonic crystal based on artificial multiferroic heterostructure. Commun. Phys. 2019;2(1):137. DOI: 10.1038/s42005-019-0240-7.
16. Fetisov YK, Srinivasan G. Electrically tunable ferrite-ferroelectric microwave delay lines. Appl. Phys. Lett. 2005;87(10):103502. DOI: 10.1063/1.2037860.
17. Shi R, Shen N, Wang J, Wang W, Amini A, Wang N, Cheng C. Recent advances in fabrication

- strategies, phase transition modulation, and advanced applications of vanadium dioxide. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(1):011312. DOI: 10.1063/1.5087864.
18. Ruzmetov D, Gopalakrishnan G, Ko C, Narayanamurti V, Ramanathan S. Three-terminal field effect devices utilizing thin film vanadium oxide as the channel layer. *J. Appl. Phys.* 2010;107(11):114516. DOI: 10.1063/1.3408899.
 19. Zhou Y, Ramanathan S. Mott memory and neuromorphic devices. *Proc. IEEE.* 2015;103(8):1289–1310. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2431914.
 20. Safi TS, Zhang P, Fan Y, Guo Z, Han J, Rosenberg ER, Ross C, Tserkovnyak Y, Liu L. Variable spin-charge conversion across metal-insulator transition. *Nat. Commun.* 2020;11(1):476. DOI: 10.1038/s41467-020-14388-9.
 21. Morin FJ. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the Neel temperature. *Phys. Rev. Lett.* 1959;3(1):34–36. DOI: 10.1103/PhysRevLett.3.34.
 22. Andreeva NV, Turalchuk PA, Chigirev DA, Vendik IB, Ryndin EA, Luchinin VV. Electron impact processes in voltage-controlled phase transition in vanadium dioxide thin films. *Chaos, Solitons & Fractals.* 2021;142:110503. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110503.
 23. Cavalleri A, Tóth C, Siders CW, Squier JA, Ráksi F, Forget P, Kieffer JC. Femtosecond structural dynamics in VO₂ during an ultrafast solid-solid phase transition. *Phys. Rev. Lett.* 2001;87(23):237401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.237401.
 24. Kikuzuki T, Lippmaa M. Characterizing a strain-driven phase transition in VO₂. *Appl. Phys. Lett.* 2010;96(13):132107. DOI: 10.1063/1.3380599.
 25. Nikitin AA, Vitko VV, Nikitin AA, Ustinov AB, Karzin VV, Komlev AE, Kalinikos BA, Lähderanta E. Spin-wave phase shifters utilizing metal–insulator transition. *IEEE Magn. Lett.* 2018;9:3706905. DOI: 10.1109/LMAG.2018.2874172.
 26. Nikitin AA, Vitko VV, Nikitin AA, Ustinov AB, Kalinikos BA. Microwave tunable devices on the YIG-VO₂ structures. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019;1400(4):044001. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/4/044001.
 27. Nikitin AA, Nikitin AA, Ustinov AB, Komlev AE, Lähderanta E, Kalinikos BA. Metal–insulator switching of vanadium dioxide for controlling spin-wave dynamics in magnonic crystals. *J. Appl. Phys.* 2020;128(18):183902. DOI: 10.1063/5.0027792.
 28. Cuff S, John J, Zhang Z, Parra J, Sun J, Orobtcouk R, Ramanathan S, Sanchis P. VO₂ nanophotonics. *APL Photonics.* 2020;5(11):110901. DOI: 10.1063/5.0028093.
 29. Watt S, Kostylev M, Ustinov AB, Kalinikos BA. Implementing a magnonic reservoir computer model based on time-delay multiplexing. *Phys. Rev. Appl.* 2021;15(6):064060. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064060.
 30. Nikitin AA, Nikitin AA, Ustinov AB, Watt S, Kostylev MP. Theoretical model for nonlinear spin-wave transient processes in active-ring oscillators with variable gain and its application for magnonic reservoir computing. *J. Appl. Phys.* 2022;131(11):113903. DOI: 10.1063/5.0081142.
 31. Chumak AV, Kabos P, Wu M, Abert C, Adelman C, Adeyeye AO, Åkerman J, Aliev FG, Anane A, Awad A, Back CH, Barman A, Bauer GEW, Becherer M, Beginin EN, Bittencourt VASV, Blanter YM, Bortolotti P, Boventer I, Bozhko DA, Bunyaev SA, Carmiggelt JJ, Cheenikundil RR, Ciubotaru F, Cotofana S, Csaba G, Dobrovolskiy OV, Dubs C, Elyasi M, Fripp KG, Fulara H, Golovchanskiy IA, Gonzalez-Ballester C, Graczyk P, Grundler D, Gruszecki P, Gubbiotti G, Guslienko K, Haldar A, Hamdioui S, Hertel R, Hillebrands B, Hioki T, Houshang A, Hu CM, Huebl H, Huth M, Iacocca E, Jungfleisch MB, Kakazei GN, Khitun A, Khymyn R, Kikkawa T, Klau M, Klein O, Klos JW, Knauer S, Koraltan S, Kostylev M, Krawczyk M, Krivorotov IN, Kruglyak VV, Lachance-Quirion D, Ladak S, Lebrun R, Li Y, Lindner M, Macedo R, Mayr S, Melkov GA, Mieszczyk S, Nakamura Y, Nembach HT, Nikitin AA, Nikitov SA, Novosad V, Otalora JA, Otani Y, Papp A, Pigeau B, Pirro P, Porod W, Porrati F, Qin H, Rana B, Reimann T, Riente F, Romero-Isart O, Ross A, Sadovnikov AV, Safin AR, Saitoh E, Schmidt G, Schultheiss H,

Schultheiss K, Serga AA, Sharma S, Shaw JM, Suess D, Surzhenko O, Szulc K, Taniguchi T, Urbanek M, Usami K, Ustinov AB, van der Sar T, van Dijken S, Vasyuchka VI, Verba R, Viola Kusminskiy S, Wang Q, Weides M, Weiler M, Wintz S, Wolski SP, Zhang X. Advances in magnetism roadmap on spin-wave computing. IEEE Trans. Magn. 2022;58(6):0800172. DOI: 10.1109/TMAG.2022.3149664.



Никитин Алексей Александрович — кандидат физико-математических наук (2019), ассистент (2019) кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Автор более 20 научных публикаций. Научные интересы: динамика намагниченности в магнитных пленках и слоистых структурах, магноники, физика нелинейных волн, компьютерное проектирование спин-волновых приборов.

Россия, 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
E-mail: alalnikitin@etu.ru
ORCID: 0000-0001-6372-3220
AuthorID (eLibrary.Ru): 879244



Комлев Андрей Евгеньевич — кандидат технических наук (2011), доцент (2014) кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Автор более 50 научных публикаций. Научные интересы: тонкие пленки, оксидные гетероструктуры, магнетронное распыление, СВЧ-электроника.

Россия, 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
E-mail: a.e.komlev@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1017-5587
AuthorID (eLibrary.Ru): 151010



Никитин Андрей Александрович — кандидат физико-математических наук (2011), доцент (2015) кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Автор более 50 научных публикаций. Научные интересы: нелинейные волновые процессы, радиофотоника, спин-волновая электроника.

Россия, 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
E-mail: and.a.nikitin@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4226-4341
AuthorID (eLibrary.Ru): 785936



Устинов Алексей Борисович — доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Научный руководитель лаборатории магноники и радиофотоники им. Б. А. Калиникова, которая была создана в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2021 году в рамках мегагранта Правительства Российской Федерации. Автор более 200 научных публикаций. Научные интересы: линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах, СВЧ-электроника, радиофотоника.

Россия, 197022 Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com
ORCID: 0000-0002-7382-9210
AuthorID (eLibrary.Ru): 125123