

Акционерное общество  
«Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»

# **СИСТЕМЫ СВЯЗИ И РАДИОНАВИГАЦИИ**

Сборник тезисов

Под редакцией Б.А. Беляева

Красноярск

2023

УДК 621.396

С34

С34 Системы связи и радионавигации: сб. тезисов / науч. ред. Б.А. Беляев, д.т.н., профессор Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева; отв. за вып. Г.П. Лопардина. – Красноярск: АО «НПП «Радиосвязь», 2023. – 284 с.

Представлены тезисы докладов участников VII Всероссийской научно-технической конференции «Системы связи и радионавигации», состоявшейся в г. Красноярске 25-27 октября 2023 г.

Отражены исследования и последние разработки в областях радиотехники и радиоэлектроники по направлениям: системы связи; радионавигационные системы; радиолокационные системы; новые физические принципы обработки, передачи и хранения информации, современные технологии для радиоэлектронной аппаратуры.

Сборник предназначен для работников промышленных предприятий, научных сотрудников, аспирантов радиотехнического профиля.

#### **Редакционная коллегия:**

Р. Г. Галеев – д-р техн. наук, генеральный директор АО «НПП «Радиосвязь»;  
В. М. Владимиров – д-р техн. наук, проф.; генеральный директор ООО НПФ «Электрон», Ю. П. Саломатов – канд. техн. наук, проф.; А. В. Гребенников – д-р техн. наук, доц.; начальник НТЦ 893 ФГУП ВНИИФТРИ, Ю.Ю. Логинов – д-р физ.-мат. наук; Е.В. Богатырев – к.т.н., заместитель генерального директора по НТР АО «НПП «Радиосвязь», А.А. Ларьков – заместитель генерального директора АО «НПП «Радиосвязь».

УДК 621.396

ISBN 978-5-9905691-5-7

© АО «НПП «Радиосвязь», 2023

© Коллектив авторов, 2023

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ УПОРЯДОЧЕННОГО МАССИВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЛЕНТ

**В. А. Орлов<sup>1,2</sup>, Р. Ю. Руденко<sup>1</sup>, А. В. Лукьяненко<sup>2</sup>, В. Ю. Яковчук<sup>2</sup>,  
В. А. Комаров<sup>2</sup>, В. С. Прокопенко<sup>3</sup>, И. Н. Орлова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>1,2</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036,  
г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

<sup>1,2,3</sup>Красноярский государственный педагогический университете им.

В.П.Астафьева, 660049, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой 89

\* E-mail: vaorlov@sfu-kras.ru

Низкомерные объекты подобные ферромагнитным микро-, нанолентам считаются перспективными объектами для использования в устройствах хранения информации и других устройствах спинтроники нового поколения [1]. Решение задачи повышения плотности записи с одновременной надежностью вынуждают исследовать магнитные свойства не только индивидуальных нанообъектов, но и их массивов [2]. Это обстоятельство неизбежно подводит к необходимости исследовать влияние взаимодействия магнитных подсистем нанообъектов на свойства массивов. Особенно это важно для устройств с высоким быстродействием и/или устройств спинтроники [3]. В настоящей работе мы представляем результаты исследования взаимодействия магнитных подсистем упорядоченных массивов ферромагнитных лент.

Массивы параллельно ориентированных лент были сформированы методом взрывной литографии. Были получены массивы лент размером  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Толщина лент  $b = 180$  нм. Расстояние между лентами в различных массивах варьировалось от 4 мкм до 0.3 мкм. Состояние намагниченности исследовалось методом магнитно-силовой микроскопии.

В результате анализа данных магнитно-силовой микроскопии обнаружено, что состояние лент практически однодоменное (преобладает ориентация намагниченности вдоль длинной оси) с замыканием потока на торцах лент

посредством комбинированных доменных стенок, включающих в себя магнитные вихри.

Вдали от торцов наблюдается рябь намагниченности, практически повторяющая неровности боковых поверхностей лент (см. рисунок 1). Поэтому мы связываем существование этой ряби с неоднородностями боковых поверхностей лент, где возникают поля рассеяния. Это справедливо для образцов а и б, где расстояние между лентами относительно велико и роль взаимодействия магнитных подсистем разных лент невелика.

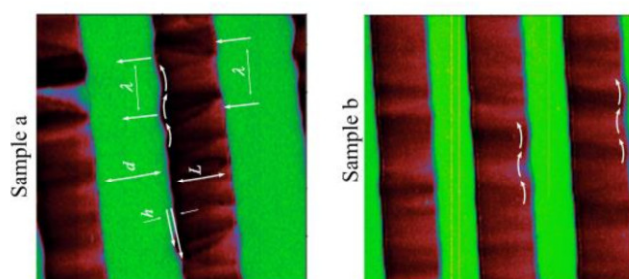


Рис.1. Магнитно-силовой контраст вдали от торцов лент у массивов а, б. Светлыми стрелками вблизи боковых поверхностей показана примерная ориентация намагниченности.

Важным обстоятельством является тот факт, что в массиве с близко расположенными лентами распределения ряби намагниченности в разных лентах заметно коррелирует, что позволяет сделать вывод о значительном магнитостатическом механизме взаимодействия магнитных подсистем посредством полей рассеяния на неоднородностях боковых поверхностей. Это позволяет сделать оценку средней константы эффективной случайной анизотропии, выполняющей роль закрепляющего фактора, связанного с дефектами поверхности.

В работе [4] предложен теоретический метод оценки полей рассеяния, созданных шероховатостями поверхности ферромагнетика. Согласно [4], поле, созданное неровностями можно оценить с помощью выражения:

$$H = M_s \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{h^2}{\lambda L} \exp\left(-\frac{2\pi d \sqrt{2}}{\lambda}\right). \quad (1)$$

Здесь  $M_s$  - намагниченность насыщения,  $h$  и  $\lambda$  - средняя глубина неровностей и средний период их следования соответственно,  $L$  – ширина магнетика (ширина лент),  $d$  - ширина немагнитного зазора (расстояние между лентами).

Оценить величину полей рассеяния можно из следующих простых рассуждений. В предположении, что все ленты намагничены в одном направлении,  $H_M$  можно оценить, проведя суммирование (1) по всем лентам массива:

$$H_M \approx 2M_s \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{h^2}{\lambda L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi d \sqrt{2}}{\lambda}\right) = M_s \sqrt{2} \frac{\pi^2 h^2}{\lambda L} \left(\exp\left(\frac{2\pi d \sqrt{2}}{\lambda}\right) - 1\right)^{-1}. \quad (3)$$

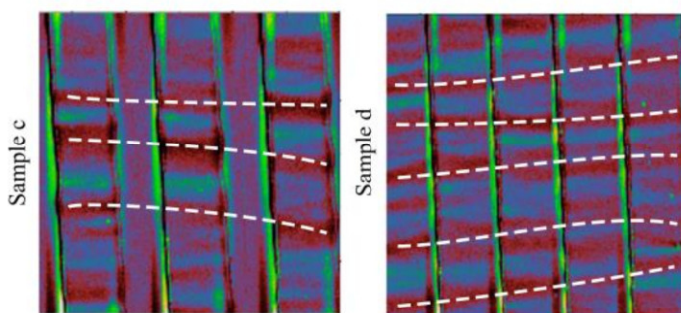


Рис.2. Магнитно-силовой контраст вдали от торцов лент.

Относительно небольшие значения коэрцитивной силы косвенно говорят о том, что процесс зарождения и движения вихревых доменных стенок вблизи торцов лент происходит в небольших полях по сравнению, например, с проволоками.

Период ряби определяется периодом неоднородностей боковых поверхностей лент. Это нарушается в массивах с относительно малым расстоянием между лентами, где наблюдается синхронизация ряби намагниченности лент вне зависимости от положения шероховатостей поверхности.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ темы FSRZ-2020-0011).

### Список литературы

[1] Allwood D. A., Xiong G., Faulkner C.C., Atkinson D., Petit D., Cowburn R.P., Magnetic Domain-Wall Logic // Science 2005. V. 309. P. 1688-1692.

[2] Song J.-F., Bird J.P., Ochiai Y., A nanowire magnetic memory cell based on a periodic magnetic superlattice // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. V. 17. P. 5263–5268.

[3] Janutka A., Complexes of Domain Walls in Ferromagnetic Stripes // Acta Physica Polonica A 2013. V. 124. P. 641-648.

[4] Tiusan C., Hehn M., Ounadjela K., Magnetic-roughness-induced magnetostatic interactions in magnetic tunnel junctions // Eur. Phys. J. B 2002. V. 26. P. 431-434.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА CORDIC**

**А.В. Соколовский**, инженер-конструктор 1 категории

АО НПП «Радиосвязь», (г. Красноярск)

E-mail: sokolovskii\_a@mail.ru

Операция деления является сложной арифметической операцией с точки зрения аппаратных затрат для целочисленной реализации. Аппаратные делители используются в частности при реализации QR разложения для решения системы линейных уравнений методом наименьших квадратов. Классическая реализация методом деления «столбиком» даёт корректный результат только для положительных чисел. В результате перед выполнением деления «столбиком» следует выполнить двоичное дополнение делимого или делителя до операции деления и еще одно двоичное дополнение частного. Вследствие чего усложняется аппаратная архитектура арифметической операции.

Альтернативным методом реализации операции деления является использование таблицы истинности и линейной интерполяции промежуточных результатов. Данный метод является приемлемым в узком круге задач, характерными особенностями которых является ограниченный диапазон значений делимого и делителя, достаточный объём памяти с низкой задержкой, а также эффективная реализация линейного интерполятора.

Также операцию деления можно реализовать на основе алгоритма CORDIC, разработанным Джеком Волдером. Преимуществом использования алгоритма CORDIC является гибкость его настройки под требуемую точность вычисления и