

ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

Министерство образования Республики Беларусь
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА»
(ВГУ ИМЕНИ П.М. МАШЕРОВА)

УДК 538.91:537.622.4

Рег. № 20210474

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
доктор педагогических наук,
профессор

Е.Я. Аршанский

_____ 2026 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Спинтронные наноразмерные генераторы и детекторы микроволнового излучения

задание 3.01.4 подпрограммы
«МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НОВЫЕ ЗАРОЖДАЮЩИЕСЯ
ТЕХНОЛОГИИ»
ГПНИ «Конвергенция - 2025»

(заключительный)

Научный руководитель НИР
к.ф.-м.н., доцент кафедры информационных
технологий и управления бизнесом

А.В. Кухарев

Витебск 2026

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры информационных
технологий и управления бизнесом

_____ А.В. Кухарев
(введение, разд. 1, 5, 6, заключение)

канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры информационных
технологий и управления бизнесом

_____ С.А. Прохожий
(разд. 2)

студент

_____ Е.А. Господарик
(разд. 3)

студент

_____ Г.А. Неверовский
(подразд. 4.1-4.2)

студент

_____ А.В. Петраковская
(подразд. 4.3-4.4)

Нормоконтроль

_____ Т.В. Харкевич

РЕФЕРАТ

Отчет 65 с., 1 кн., 69 источника, 1 прил.

СПИНТРОНИКА, ПЕРЕНОС СПИНА, СПИНТРОННЫЕ НАНООСЦИЛЛЯТОРЫ, МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕ, ФЕРРОМАГНИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ, УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ

Объектом исследования являются спин-зависимые транспортные и динамические процессы в металлических спинтронных наноструктурах.

Цель работы – разработка моделей и установление закономерностей поглощения электромагнитного излучения ферромагнитными гетерогенными наноструктурами и генерации в них колебаний намагниченности и спин-поляризованного тока, разработка метода синхронизации и усиления взаимодействующих спинтронных nanoосцилляторов.

При проведении исследования использованы аналитические методы теории магнетизма, уравнения магнитной динамики с учётом вращающего момента переноса спина, методы численного моделирования, а также программы микромагнитного моделирования MuMax3 и NMag.

В ходе проведенного исследования методами численного моделирования изучены условия возбуждения устойчивых колебаний намагниченности в наноструктурах Co/Cu/Co, определены пороговые токи и частотные диапазоны генерации. Проанализированы переходные процессы в спинтронных наноструктурах при воздействии ультракоротких лазерных импульсов. Исследованы механизмы дальнедействующего косвенного обменного взаимодействия между ферромагнитными наночастицами, инкапсулированными в углеродные нанотрубки.

В результате проведенной работы сформулированы рекомендации по разработке СВЧ-передатчиков и приёмников на основе спинтронных nanoосцилляторов, направленные на снижение пороговых токов, повышение спектральной чистоты и стабильности генерации, а также расширение функциональных возможностей спинтронных устройств.

Результаты исследования опубликованы в научных статьях и материалах конференций и внедрены в учебный процесс.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Процессы переноса спина и генерации колебаний намагниченности в наноразмерных многослойных наноструктурах ферромагнетик/немагнитный металл/ферромагнетик.....	12
1.1 Ранние исследования влияния тока на состояние ферромагнетика.....	12
1.2 Поверхностный механизм переноса спина Слончевского – Берже.....	12
1.3 Инжекционный механизм переноса спина.....	16
1.4 Генерация колебаний намагниченности спин-поляризованным током.....	17
2 Математическая модель для описания колебаний намагниченности при воздействии на ферромагнетик спин-поляризованного тока.....	19
2.1 Уравнение Ландау–Лифшица–Гильберта–Слончевского–Берже в сферических координатах.....	19
2.2 Учет магнитной анизотропии и формы ферромагнетика.....	21
3 Результаты численного моделирования колебаний намагниченности в наноструктуре CoFeB/Cu/CoFeB в приближении макроспина.....	24
3.1 Изучение зависимости частоты колебаний намагниченности от плотности тока.....	24
3.2 Влияние геометрических размеров структуры на частоту колебаний намагниченности.....	25
3.3 Влияние теплового шума на колебания намагниченности.....	28
4 Микромагнитное моделирование колебаний намагниченности.....	30
4.1 Уравнение движения вектора намагниченности в программе MuMax3.....	30
4.2 Микромагнитное моделирование колебаний намагниченности в наноструктуре Co/Cu/Co.....	31
4.3 Изучение влияния параметра затухания Гильберта на частоту и пороговые токи в наноструктуре Co/Cu/Co.....	32
4.4 Переходные процессы в наноструктуре ферромагнетик/немагнитный металл/ферромагнетик при действии лазерных импульсов.....	34
5 Магнитное состояние ферромагнетика цилиндрической формы, инкапсулированного в	

углеродную нанотрубку.....	37
5.1 Влияние механических напряжений на магнитное состояние ферромагнетика цилиндрической формы.....	37
5.2 Дальнодействующее обменное взаимодействие в ферромагнитных наноструктурах.....	40
6 Рекомендации по разработке передатчиков и приемников СВЧ-излучения на основе спинтронных наноосцилляторов.....	46
6.1 Общие принципы проектирования СВЧ-устройств на основе спинтронных наноосцилляторов.....	46
6.2 Рекомендации по выбору материалов ферромагнитных слоёв.....	47
6.3 Оптимизация геометрии и архитектуры спин-вентильных наноструктур.....	48
6.4 Условия возбуждения устойчивых колебаний намагниченности.....	50
6.5 Рекомендации по снижению пороговых токов и энергопотребления.....	51
6.6 Повышение спектральной чистоты и стабильности СВЧ-генерации.....	52
6.7 Особенности применения спинтронных наноосцилляторов в качестве СВЧ-приёмников.....	53
6.8 Перспективы практического применения и дальнейшие направления исследований.....	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	55
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	65

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяются следующие сокращения и обозначения:

- СВЧ – сверхвысокая частота;
- ДМ – диамагнитный металл;
- КОВ — косвенное обменное взаимодействие;
- МКА – магнитная кристаллографическая анизотропия;
- МУНТ – многостенная углеродная нанотрубка;
- НМ – немагнитный металл;
- ОЛН – ось легкого намагничивания;
- РККИ — (взаимодействие) Рудермана – Киттеля – Касуя – Иосиды;
- СОВ — спин-орбитальное взаимодействие;
- УНТ – углеродная нанотрубка;
- Ф – ферромагнетик;
- ФНЧ – ферромагнитная наночастица;
- STNO – spin-torque nano-oscillator (наноосциллятор со спиновым крутящим моментом);
- d – толщина свободного ферромагнитного слоя;
- \mathbf{h} – нормированный вектор напряженности магнитного поля;
- \mathbf{H} – напряженность магнитного поля;
- I – интенсивность лазерного излучения;
- j – плотность электрического тока;
- f – частота колебаний намагниченности;
- J – нормированная плотность электрического тока;
- K_a – константа магнитокристаллографической анизотропии одноосного ферромагнетика;
- k_a – нормированная константа (одноосной) анизотропии;
- l – эффективная длина спиновой диффузии;
- L – толщина диамагнитного слоя;
- M – намагниченность насыщения;
- \mathbf{M} – вектор намагниченности;
- \mathbf{m} – единичный вектор вдоль направления намагниченности свободного ферромагнитного слоя;
- n – показатель преломления;
- \mathbf{N} – тензор эффективных размагничивающих факторов;

ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ

P – степень спиновой поляризации;

R – радиус свободного ферромагнитного слоя;

s – единичный вектор вдоль направления намагниченности закрепленного ферромагнитного слоя (поляризатора);

t – время;

T – температура;

Q – коэффициент поляризации тока;

α – параметр магнитной диссипации Гильберта;

γ – гиромагнитное отношение;

ε – аспектное отношение;

τ – нормированное время;

χ — статическая спиновая восприимчивость электронов проводимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аронов, А. Г. О спиновой инжекции электронов в немагнитные проводники / А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10, № 10. – С. 1177–1180.
2. Dyakonov, M. I. Possibility of orienting electron spins with current / M. I. Dyakonov, V. I. Perel // Physics Letters A. – 1971. – Vol. 35, № 6. – P. 459–460.
3. Julliere, M. Tunneling between ferromagnetic films / M. Julliere // Physics Letters A. – 1975. – Vol. 54, № 3. – P. 225–226.
4. Baibich, M. N. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices / M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert [et al.] // Physical Review Letters. – 1988. – Vol. 61, № 21. – P. 2472–2475.
5. Valet, T. Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnetic multilayers / T. Valet, A. Fert // Physical Review B. – 1993. – Vol. 48, № 10. – P. 7099–7113.
6. Katine, J. A. Current-driven magnetization reversal and spin-wave excitations in Co/Cu/Co pillars / J. A. Katine, F. J. Albert, R. A. Buhrman [et al.] // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 84, № 14. – P. 3149–3152.
7. Berger, L. Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current / L. Berger // Physical Review B. – 1996. – Vol. 54, № 13. – P. 9353–9358.
8. Slonczewski, J. C. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. C. Slonczewski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1996. – Vol. 159. – P. L1–L7.
9. Kiselev, S. I. Microwave oscillations of a nanomagnet driven by a spin-polarized current / S. I. Kiselev [et al.] // Nature. – 2003. – Vol. 425. – P. 380–383.
10. Puliafito, V. Micromagnetic modeling of nanocontact spin-torque oscillators with perpendicular anisotropy at zero bias field / V. Puliafito [et al.] // IEEE Transactions on Magnetics. – 2008. – Vol. 44, № 11. – P. 2512–2515.
11. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности в ферромагнитных наноструктурах при воздействии спин-поляризованного тока и упругих напряжений / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Прикладная физика. – 2011. – № 4. – С. 12–19.
12. Kirilyuk, A. Ultrafast optical manipulation of magnetic order / A. Kirilyuk, A. V. Kimel, Th. Rasing // Reviews of Modern Physics. – 2010. – Vol. 82, № 3. – P. 2731–2784.

13. Maehara, H. High Q factor over 3000 due to out-of-plane precession in nano-contact spin-torque oscillator based on magnetic tunnel junctions / H. Maehara [et al.] // *Applied Physics Express*. – 2014. – Vol. 7. – P. 023003.
14. Mitrofanov, A. A. A system of phase synchronization of a spin-transfer nano-oscillator / A. A. Mitrofanov, A. R. Safin, N. N. Udalov // *Technical Physics Letters*. – 2014. – Vol. 40, № 7. – P. 571–573.
15. Klinovaja, J. RKKY interaction in carbon nanotubes and graphene nanoribbons / J. Klinovaja, D. Loss // *Physical Review B*. – 2013. – Vol. 87. – P. 045422.
16. Danilyuk, A. L. Anisotropy of assemblies of densely packed co-alloy nanoparticles embedded in carbon nanotubes / A. L. Danilyuk, A. V. Kukharev, S. L. Prischepa // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2019. – Vol. 55. – P. 2300304.
17. Berger, L. Low-field magnetoresistance and domain drag in ferromagnets / L. Berger // *Journal of Applied Physics*. – 1978. – Vol. 49, № 3. – P. 2156–2161.
18. Freitas, P. P. Observation of s-d exchange force between domain walls and electric current in very thin permalloy films / P. P. Freitas, L. Berger // *Journal of Applied Physics*. – 1985. – Vol. 57, № 4. – P. 1266–1268.
19. Hung, C. Y. Exchange forces between domain wall and electric current in permalloy films of variable thickness / C. Y. Hung, L. Berger // *Journal of Applied Physics*. – 1988. – Vol. 63, № 8. – P. 4276–4278.
20. Звездин, А. К. Обобщенное уравнение Ландау-Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах / А. К. Звездин, К. А. Звездин, А. В. Хвальковский // *Успехи физических наук*. – 2008. – Т. 178, № 4. – С. 436–442.
21. Гуляев, Ю. В. Спиновые токи и их применение в наноэлектронике / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – Т. 54, № 10. – С. 1193–1212.
22. Ralph, D. C. Spin transfer torques / D. C. Ralph, M. D. Stiles // *JMMM*. – 2008. – Vol. 320. – P. 1190–1216.
23. Stiles, M. D. Anatomy of spin-transfer torque / M. D. Stiles, A. Zangwill // *Phys. Rev. B*. – 2002. – Vol. 66, № 1. – P. 014407.
24. Excitation of a Magnetic Multilayer by an Electric Current / M. Tsoi [et al.] // *Phys. Rev. Lett*. – 1998. – Vol. 80, № 19. – P. 4281–4284.
25. Albert, F. J. Spin-polarized current switching of a Co thin film nanomagnet / F. J. Albert // *Appl. Phys. Lett*. – 2000. – Vol. 77, № 23. – P. 3809–3811.

26. Sato, R. Current-dependent linewidth of a spin-transfer nano-oscillator / R. Sato, Y. Saito, K. Mizushima // *JMMM*. – 2009. – Vol. 321. – P. 990–995.
27. Hayashi, M. Microwave assisted resonant domain wall nucleation in permalloy nanowires / M. Hayashi, Y. K. Takahashi, S. Mitani // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 172406.
28. Rippard, W. H. Direct-Current Induced Dynamics in Co₉₀Fe₁₀/Ni₈₀Fe₂₀ Point Contacts / W. H. Rippard // *Phys. Rev. Lett.* – 2004. – Vol. 92. – P. 027201.
29. Li, Z. Magnetization dynamics with a spin-transfer torque / Z. Li, S. Zhang // *Phys. Rev. B*. – 2003. – Vol. 68. – P. 024404.
30. Magnetization reversal driven by spin-polarized current in exchange-biased nanoscale spin valves / G. Finocchio [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2007. – Vol. 76. – P. 174408.
31. Micromagnetic modeling of nanocontact spin-torque oscillators with perpendicular anisotropy at zero bias field / V. Puliafito [et al.] // *IEEE Trans. Magn.* – 2008. – Vol. 44. – P. 2512–2515.
32. Kent, A. D. Spin-transfer-induced precessional magnetization reversal / A. D. Kent, B. Ozyilmaz, E. del Barco // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 84. – P. 3897–3899.
33. Lee, K. J. Analytical investigation of spin-transfer dynamics using a perpendicular-to-plane polarizer / K. J. Lee, O. Redon, B. Dieny // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 86. – P. 022505.
34. Macrospin description of the perpendicular polarizer-planar free-layer spin-torque oscillator / U. Ebels [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 78. – P. 024436.
35. Zeng, Z. Spin transfer nano-oscillators / Z. Zeng, G. Finocchio, H. Jiang // *Nanoscale*. – 2013. – Vol. 5. – P. 2219–2231.
36. Strong linewidth variation for spin-torque nano-oscillators as a function of in-plane magnetic field angle / K. V. Thadani [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 78. – P. 024409.
37. Slavin, A. N. Spin wave mode excited by spin-polarized current in a magnetic nanocontact in a standing self-localized wave bullet / A. N. Slavin, V. S. Tiberkevich // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 95. – P. 237201.
38. Slavin, A. N. Theory of mutual phase locking of spin-torque nanosized oscillators / A. N. Slavin, V. S. Tiberkevich // *Phys. Rev. B*. – 2006. – Vol. 74. – P. 104401.

39. Analytical treatment of synchronization of spin-torque oscillators by microwave magnetic fields / R. Bonin [et al.] // *Eur. Phys. J. B.* – 2009. – Vol. 68. – P. 221–231.
40. Tiberkevich, V. S. Nonlinear phenomenological model of magnetic dissipation for large precession angles: generalization of the Gilbert model / V. S. Tiberkevich, A. N. Slavin // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol. 75. – P. 014440.
41. Micromagnetic simulations of persistent oscillatory modes excited by spin-polarized current in nanoscale exchange-biased spin valves / G. Siracusano [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – P. 07D107.
42. Tulapurkar, A. A. Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions / A. A. Tulapurkar // *Nature.* – 2005. – Vol. 438. – P. 339–342.
43. Zhou, Y. Perpendicular spin torque promotes synchronization of magnetic tunnel junction based spin torque oscillators / Y. Zhou, J. Akerman // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P. 112503.
44. Спин-инжекционный механизм перемагничивания и гистерезис тока в магнитных переходах / Ю. В. Гуляев [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 2002. – Т. 76, № 3. – С. 189–193.
45. Инжекция спинов током в магнитных переходах металл - металл / Ю. В. Гуляев [и др.] // *Радиотехника и электроника.* – 2003. – Т. 48, № 9. – С. 1030–1044.
46. Гуляев, Ю. В. Теория вызываемой током неустойчивости в ферромагнитных металлических переходах: совместное действие инъекции неравновесных продольных спинов и поверхностного крутильного момента / Ю. В. Гуляев, П. Е. Зильберман, Э. М. Эпштейн // *Радиотехника и электроника.* – 2005. – Т. 50, № 9. – С. 1031–1047.
47. Спинтроника: обменное переключение ферромагнитных металлических переходов при малой плотности тока / Ю. В. Гуляев [и др.] // *УФН.* – 2009. – Т. 179, № 4. – С. 359–368.
48. Аронов А. Г. Спиновая инжекция в полупроводниках / А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус // *ФТП.* – 1976. – Т. 10, № 6. – С. 1177–1179.
49. Johnson, M. Spin injection in metals: The bipolar spin transistor / M. Johnson // *JMMM.* – 1996. – Vol. 156. – P. 321–324.
50. Магнитная анизотропия Co/Cu/Co пленок с ультратонкими слоями кобальта / А. В. Огнеев, А. С. Самардак, Ю. Д. Воробьев, Л. А. Чеботкевич // *Физика твердого тела.* – 2004. – Т. 46, вып. 6. – С. 1054–1059.

51. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – М. : Наука, 1978. – 792 с.
52. Скороцкий, Г. В. Еще раз об уравнение Ландау–Лифшица / Г. В. Скороцкий // УФН. – 1984. – Т. 144, № 4. – С. 681.
53. Кухарев, А. В. Колебания намагниченности в наноструктуре ферромагнетик/ немагнитный металл/ ферромагнетик под действием поляризованного по спину тока / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // Микроэлектроника. – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 9–19.
54. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1032 с.
55. Боровик, Е. С. Лекции по магнетизму / Е. С. Боровик, В. В. Еременко, А. С. Мильнер. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 512 с.
56. Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – М. : Физматлит, 1994. – 464 с.
57. Кравчук, В. П. Тонкий ферромагнитный нанодиск в поперечном магнитном поле / В. П. Кравчук, Д. Д. Шека // ФТТ. – 2007. – Vol. 49, № 10. – С. 1834–1841.
58. Polovinkin, A. V., & Mishagin, K. G. (2018). An Analytical Approach to Determining the Influence of Thermal Noise on the Mean Frequency and Amplitude of a Spin-Transfer Nano-Oscillator. *Technical Physics Letters*, 44(4), 324–327.
59. Vansteenkiste, A. MuMax3: a GPU-accelerated micromagnetic simulation package [Электронный ресурс] / A. Vansteenkiste [et al.]. – URL: <https://mumax.github.io/> (дата обращения: 30.12.2025).
60. Xiao, J. Boltzmann test of Slonczewski's theory of spin-transfer torque / J. Xiao, A. Zangwill, M. Stiles // *Phys. Rev. B*. – 2004. – Vol. 70. – P. 172405.
61. Vomir, M. Real Space Trajectory of the Ultrafast Magnetization Dynamics in Ferromagnetic Metals / M. Vomir // *Phys. Rev. Lett.* – 2005. – Vol. 94. – P. 237601.
62. Кухарев, А. В. Моделирование изменений намагниченности в ферромагнитных дисках из кобальта при воздействии пикосекундных лазерных импульсов / А. В. Кухарев, А. Л. Данилюк, В. Е. Борисенко // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2011. – Т. 78, № 6. – С. 912–919.
63. Danilyuk A.L., Komissarov I.V., Kukharev A.V. et al. Impact of CNT medium on the interaction between ferromagnetic nanoparticles // *EPL*. 2017. Vol. 117. P. 27007.
64. Ruoff R.S., Qian D., Liu W.K. Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions // *C. R. Physique* 2003. Vol. 4. P. 993-1008.

65. Fangohr, H. NMAG User Manual Documentation [Электронный ресурс] / H. Fangohr. – URL: <https://nmag-project.github.io/> (дата обращения: 30.12.2025).
66. Klinovaja, J. RKKY interaction in carbon nanotubes and graphene nanoribbons / J. Klinovaja, D. Loss // *Physical Review B*. – 2013. – Vol. 87, № 4. – P. 045422.
67. Direct measurement of the Fermi energy in graphene using a double-layer heterostructure / S. Kim, I. Jo, D. C. Dillen [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2012. – Vol. 108, № 11. – P. 116404.
68. Charge transfer and Fermi level shift in p-doped single-walled carbon nanotubes / W. Zhou, J. Vavro, N. M. Nemes [et al.] // *Physical Review B*. – 2005. – Vol. 71, № 20. – P. 205423.
69. Kogan, E. RKKY interaction in graphene / E. Kogan // *Physical Review B*. – 2011. – Vol. 84, № 11. – P. 115119.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень публикаций исполнителями НИР за 2021–2025 годы

Публикации в изданиях из перечня ВАК Республики Беларусь и зарубежных изданиях

1. Danilyuk, A.L. Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / A.L. Danilyuk, A.V. Kukharev; S.L. Prischepa // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – DOI: 10.1109/TMAG.2021.3102403.

2. Данилюк, А.Л. Косвенное обменное взаимодействие в углеродных нанотрубках / А.Л. Данилюк, А.В. Кухарев, В.А. Зайцев, С.Л. Прищепа // Доклады БГУИР. – 2022. – 20(2). С. 13-20.

Публикации в сборниках материалов международных научно-практических конференций

1. Prischepa, S.L. Long-Range Exchange Interaction Between Ferromagnetic Nanoparticles Embedded in Carbon Nanotubes / S.L. Prischepa, A.L. Danilyuk, A.V. Kukharev // IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG21) : Digest Book, A virtual confirence, 26-30 April, 2021 – P. 1303.

2. Прищепа, С.Л. Дальнодействующее косвенное обменное взаимодействие в многостенных углеродных нанотрубках / С.Л. Прищепа, А.В. Кухарев, А.Л. Данилюк // Мокеровские чтения. 12-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 19–20 мая 2021 г.: сборник трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 49-50.

3. Кухарев, А.В. Моделирование колебаний намагниченности, возникающих под действием спин-поляризованного тока в отсутствие внешнего магнитного поля / А.В. Кухарев, А.В. Петраковская, Г.А. Неверовский // Технические средства защиты информации : тез. докл. XX Белорусско-российской науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 7 июня 2022 года) / редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск : БГУИР, 2022. – С. 62 - 63.

4. Кухарев А.В., Неверовский Г.А., Петраковская А.В. Влияние параметра затухания на колебания намагниченности, возбуждаемые в ферромагнитных наноструктурах спин - поляризованным током // Материалы и структуры современной электроники : материалы X Междунар. науч. конф., Минск, 12–14 окт. 2022 г. /

Белорус. гос. ун-т. – Минск : БГУ, 2022. – С. 101-104.

5. Данилюк, А.Л. Воздействие электромагнитных импульсов на углеродный композит / А.Л. Данилюк, А.В. Кухарев // Технические средства защиты информации : тез. докл. XXI Белорусско-российской науч.-техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 6 июня 2023 года) / редкол. : Т. В. Борботько [и др.]. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 32.

6. Кухарев А.В. Моделирование колебаний намагниченности в наноструктуре CoFeV/Cu/CoFeV при воздействии спин-поляризованного тока / А.В. Кухарев А.В., Е.А. Господарик // Компьютерное проектирование в электронике : сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, г. Минск, 28 ноября 2024 года) / редкол. : В. Р. Стемпицкий [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 83-86.

7. Господарик Е.А. Моделирование колебаний намагниченности в спинтронных наноосцилляторах с учетом диссипативных процессов / Е.А. Господарик // Молодежь XXI века: образование, наука, инновации : материалы XII Международной конференции аспирантов и молодых ученых, Витебск, 5 декабря 2025 г. : в 2 т. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2025. – Т. 1. – С. 13-15.