

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

Спиновые волны в связанных феррит-полупроводниковых структурах

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2211 группы

направления 03.04.01 Прикладные математика и физика

Института физики

Аверина Никиты Валерьевича

Научный руководитель
Профессор, д.ф.-м.н.,
доцент

подпись, дата

М.А. Морозова

Зав. кафедрой
нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент

подпись, дата

Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

Введение

Актуальность. Спиновые волны (магнитостатические волны) представляют собой коллективные возбуждения магнитных моментов в магнитоупорядоченных средах и являются объектом исследования магноники [1]. Принципиальное отличие магноники от классической электроники — носителем информации выступает спин, а не заряд, что позволяет снизить тепловые потери [2]. Гибридные феррит-полупроводниковые структуры позволяют реализовать электрическое управление магنونными сигналами [3]. Многие вопросы взаимодействия спиновых волн с носителями заряда в многослойных структурах остаются недостаточно изученными [4].

Целью работы является расчёт коэффициентов в волновых уравнениях с учётом нелинейности для амплитуд огибающих спиновых волн в зависимости от проводимости и скорости движения зарядов в полупроводниковом слое, а также изучение влияния данных параметров на характер перекачки мощности. В качестве предмета исследования будет выступать взаимодействие спиновых волн с носителями заряда в полупроводнике.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка программы расчёта коэффициентов волновых уравнений, описывающих распространение связанных спиновых волн в феррит-полупроводниковой структуре;
- исследование зависимости групповой скорости, коэффициентов связи, затухания и коэффициента нелинейности от проводимости полупроводника и скорости движения носителей заряда;
- разработка программы численного моделирования эволюции амплитуд огибающих спиновых волн в линейном и нелинейном режимах;
- исследование влияния проводимости полупроводникового слоя и скорости движения носителей заряда на характер перераспределения мощности между магнитными плёнками;

- исследование влияния нелинейности и мощности входного сигнала на процессы перекачки мощности;

Новизна работы состоит в том, что впервые проведено комплексное численное исследование линейной и нелинейной динамики спиновых волн именно в трёхслойной феррит-полупроводниковой структуре. Получены новые результаты по зависимости коэффициента нелинейности γ от проводимости и скорости зарядов, выявлены и классифицированы режимы перекачки мощности (затухание, стационарное деление, усиление, подавление) при совместном варьировании параметров структуры [5]. Практическая значимость результатов заключается в возможности использования полученных данных при проектировании управляемых магнонных устройств — направленных ответвителей, переключателей, усилителей и элементов магнонной логики.

Структура работы. Работа состоит из 7 глав: введение, обзор результатов исследований спиновых волн в феррит-полупроводниковых структурах, расчёт коэффициентов волновых уравнений для спиновых волн в феррит-полупроводниковых структурах, исследование перекачки мощности в феррит-полупроводниковых структурах, исследование влияния нелинейности на перекачку мощности в феррит-полупроводниковых структурах, заключение и список использованных источников (51 наименование). Основные теоретические положения, стоящие за содержанием работы, изложены во второй главе, а уже практическая часть представлена в 3, 4 и 5 главе. Общий объём – 67 страниц.

Основное содержание работы

В главе 1 «Обзор результатов исследований спиновых волн в феррит-полупроводниковых структурах» рассмотрены физические основы распространения спиновых волн. Ферриты, в частности железо-иттриевый гранат (ЖИГ), обладают низким уровнем СВЧ-потерь и слабой магнитной анизотропией [5]. Среди магнитостатических волн выделяют поверхностные

магнитостатические волны (ПМСВ), характеризующиеся локализацией энергии у поверхности плёнки [6]. Динамика намагниченности описывается уравнением Ландау–Лифшица [7]. В многослойных структурах наблюдается периодическая перекачка сигнала между волноводами [8]. Проводимость полупроводника и скорость дрейфа носителей влияют на дисперсию и затухание [9]. При увеличении амплитуды волны нелинейные эффекты изменяют характер перекачки [10].

В главе 2 «Расчёт коэффициентов волновых уравнений для спиновых волн в феррит-полупроводниковых структурах» представлена математическая модель трёхслойной структуры. С использованием метода сшивания поверхностных проводимостей получена система связанных волновых уравнений для комплексных амплитуд огибающих [11]:

$$\begin{cases} j\left(\frac{\partial A_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial A_1}{\partial y}\right) + \chi_1 A_2 + j\alpha_1 A_1 = 0 \\ j\left(\frac{\partial A_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial A_2}{\partial y}\right) + \chi_2 A_1 + j\alpha_2 A_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Расчёты проводились при параметрах: $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$ Гн/м, $k_0 = 15 * 10^3$ 1/м, $\omega = 31 * 10^9$ Гц, $K = 0,02$, $\gamma_n = 176 * 10^9$ Гц/Тс, $H_0 = 0,1$ Тс, $M_0 = 0.014$ Тс, $\delta_\sigma = 1$, $d = 10 * 10^{-6}$ м.

Установлено, что увеличение проводимости σ приводит к росту действительной и мнимой частей групповой скорости V_0 и коэффициента связи χ_0 (рис. 1). Коэффициент затухания α_0 изменяется слабо, что указывает на эффективность управления связью через проводимость без значительного увеличения потерь [12].

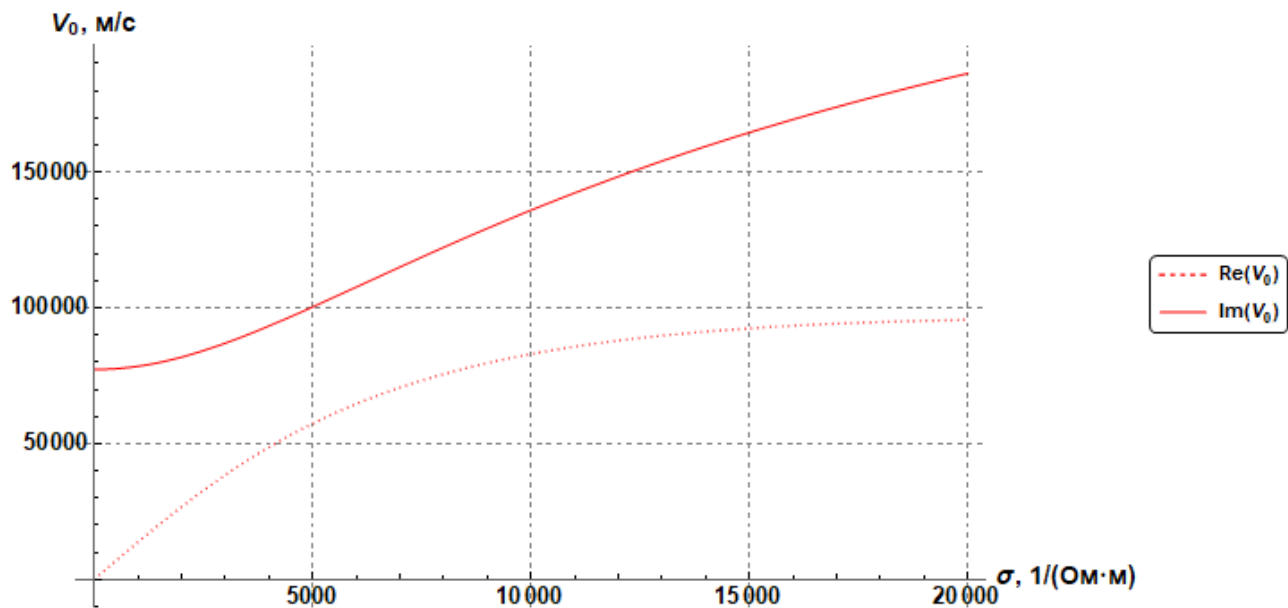


Рисунок 1 – Зависимость действительных и мнимых частей V_0 от проводимости σ .

Обнаружена резонансная скорость $v_{res} = \omega/k_0 \approx 2 \cdot 10^6$ м/с, при которой все кривые для различных σ сходятся (рис. 2). В этой точке влияние полупроводника исчезает, и структура ведёт себя как две связанные ферритовые плёнки без полупроводника. При встречном движении зарядов резонанс отсутствует — взаимодействие всегда приводит к затуханию (рис. 3).

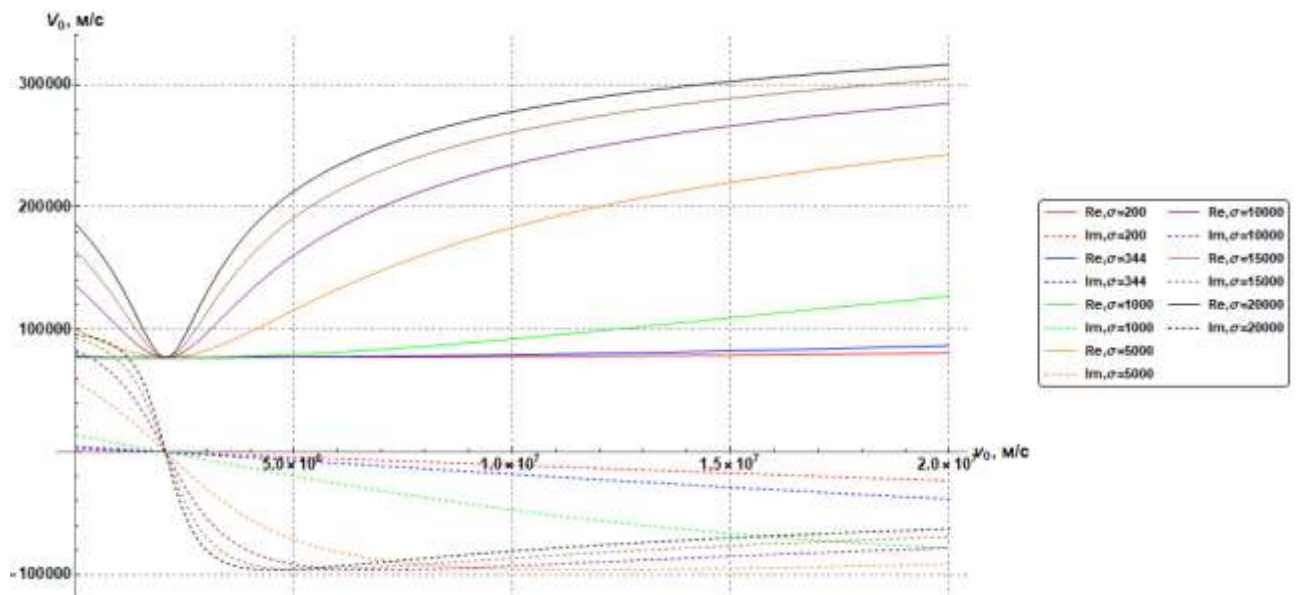


Рисунок 2 – Зависимость действительной и мнимой частей групповой скорости V_0 от скорости движения зарядов v_0 при различных значениях проводимости σ (попутное направление).

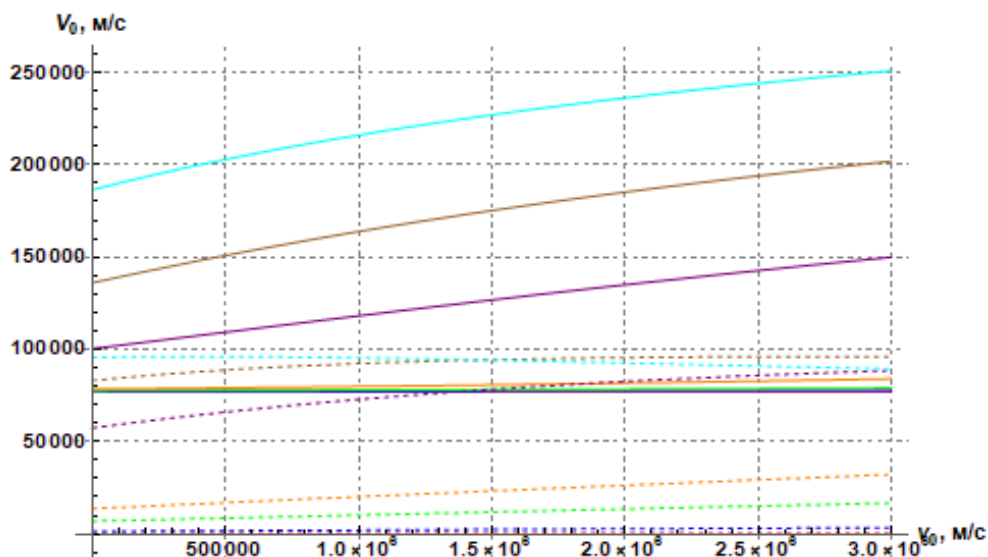


Рисунок 3 – Зависимость действительной и мнимой частей групповой скорости V_g от скорости движения зарядов v_0 при различных значениях проводимости σ (встречное направление).

В главе 3 «Исследование перекачки мощности в феррит-полупроводниковых структурах» представлены результаты моделирования перекачки мощности. В линейном режиме при $\sigma = 0$ наблюдается периодическая перекачка без затухания. С ростом σ до $1000 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ появляются диссипативные потери, а при $\sigma = 12000 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ перекачка затухает.

При сонаправленном движении зарядов выявлены три режима: затухание ($v_0 < v_{res}$), стационарная перекачка ($v_0 = v_{res}$) и усиление ($v_0 > v_{res}$) (рис. 4). При встречном движении наблюдается только затухание.

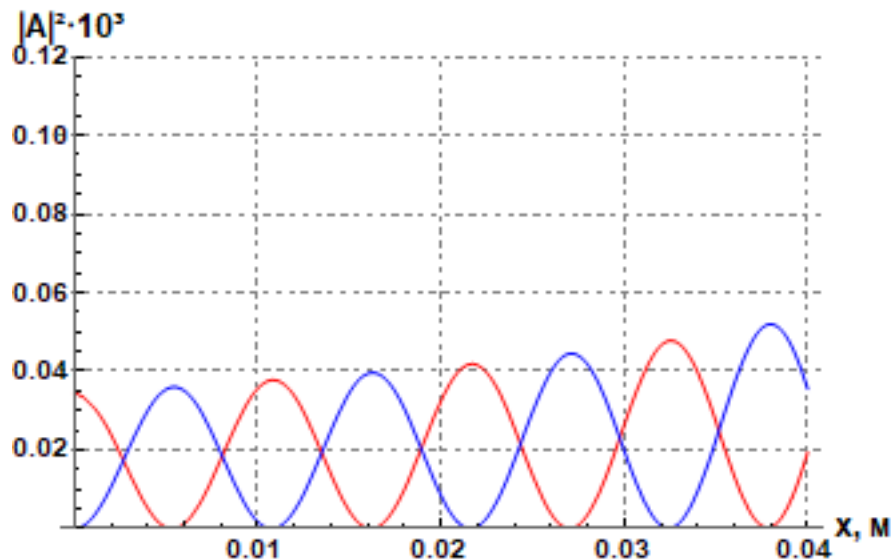


Рисунок 4 – Медленно меняющиеся комплексные амплитуды огибающих прямых волн в двух магнитных плёнках при скорости $v_0 = 2 * 10^7$. Режим $v_0 > v_{res}$.

В главе 4 «Исследование влияния нелинейности на перекачку мощности в феррит-полупроводниковых структурах» рассмотрены нелинейные эффекты. Нелинейность типа Керра обусловлена уменьшением продольной компоненты намагниченности с ростом амплитуды: $M \approx M_0(1 - q|m|^2)$ [18]. Коэффициент нелинейности γ_0 зависит от σ и v_0 , причём при $v_0 = v_{res}$ его зависимость от проводимости исчезает.

В нелинейном режиме выявлены три режима перекачки в зависимости от σ : рис. 5 - подавление ($\sigma = 10$, мощность остается в одной плёнке), рис. 6 - деление мощности ($\sigma = 500 - 1000$, мощность делится между плёнками поровну и не перекачивается), рис. 7 - затухание ($\sigma > 5000$, мощность спадает до нуля).

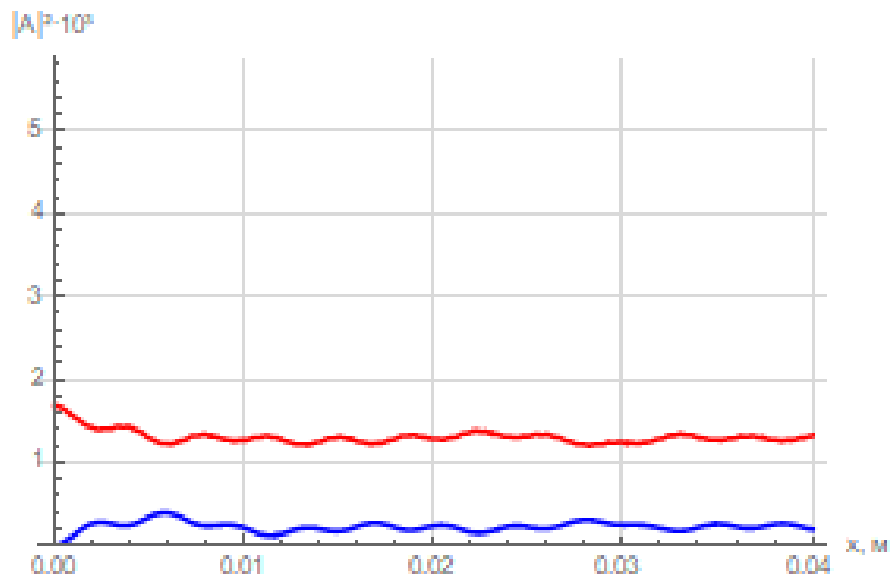


Рисунок 5 – Перекачка мощности при амплитуде входного сигнала $P_{01} = 0.07$ для случая $\sigma = 0 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

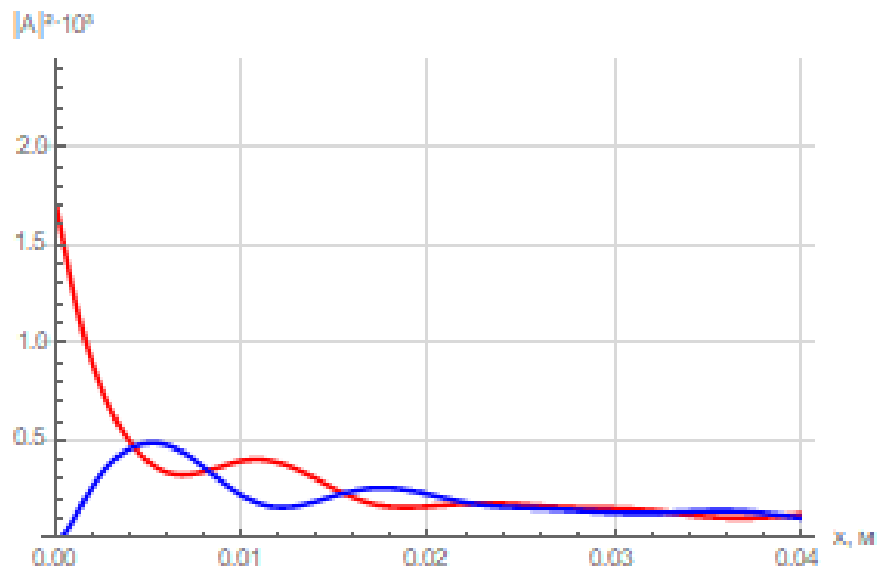


Рисунок 6 – Перекачка мощности при амплитуде входного сигнала $P_{01} = 0.07$ для случая $\sigma = 1000 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

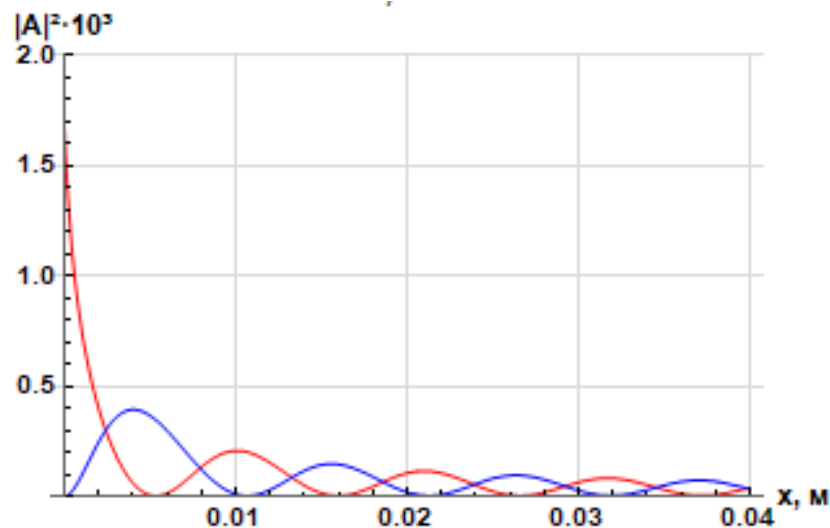


Рисунок 7 – Перекачка мощности при амплитуде входного сигнала $P_{01} = 0.07$ для случая $\sigma = 5000 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.

При изменении v_0 также реализуются режимы деления, подавления и усиления. При встречном движении — только затухание.

Заключение

В магистерской работе было проведено численное исследование линейной и нелинейной динамики спиновых волн в трёхслойной феррит-полупроводниковой структуре «магنونная плёнка – полупроводник – магنونная плёнка». Было проанализировано поведение системы связанных волновых уравнений, учитывающую влияние проводимости полупроводникового слоя σ и скорости дрейфа носителей заряда v_0 . В нелинейном случае система дополнена керровским нелинейным членом $\gamma_0 |A|^2 A$.

Разработана программа в Wolfram Mathematica, позволяющая рассчитывать комплексные коэффициенты волновых уравнений (групповую скорость V_0 , коэффициент связи χ_0 , коэффициент затухания α_0 и коэффициент нелинейности γ_0) и моделировать эволюцию амплитуд огибающих спиновых волн в линейном и нелинейном режимах. В результате было установлено:

- В линейном режиме проводимость полупроводника приводит к затуханию перекачки мощности между плёнками за счёт джоулевых потерь. С ростом

σ осцилляции перекачки быстро затухают, а при высоких проводимостях перекачка полностью подавляется;

- Скорость движения зарядов v_0 является мощным управляющим параметром. При попутном направлении (v_0 параллельно групповой скорости волны) выявлены три характерных режима: затухание (при $v_0 < v_{res}$), стационарная (ровная) перекачка мощности в окрестности резонансной скорости v_{res} (где влияние полупроводника практически исчезает), и усиление спиновой волны (при $v_0 > v_{res}$). При встречном направлении наблюдается только режим затухания перекачки во всём диапазоне скоростей;
- В нелинейном режиме характер перекачки существенно зависит от сочетания проводимости, скорости зарядов и амплитуды входного сигнала. При малой проводимости ($\sigma \rightarrow 0$) с ростом амплитуды наблюдается эффект подавления перекачки – мощность остаётся локализованной в возбуждаемой плёнке. При промежуточных значениях проводимости возникает режим деления (стационарного распределения) мощности между плёнками. При высоких σ доминирует режим быстрого затухания;
- Варьирование скорости v_0 в нелинейном случае позволяет переключать систему между режимами подавления, деления и затухания перекачки, а также реализовывать усиление спиновой волны при попутном направлении и достаточно больших скоростях.

Таким образом, проводимость полупроводникового слоя и электрическое напряжение (определяющее v_0) позволяют эффективно управлять как линейными, так и нелинейными свойствами структуры, включая перекачку мощности, её подавление и усиление спиновых волн. Обнаруженная резонансная скорость v_{res} , при которой коэффициенты системы совпадают с коэффициентами структуры без полупроводника, открывает удобный способ электрического «отключения» влияния полупроводникового слоя.

Полученные результаты расширяют понимание механизмов взаимодействия спиновых волн с носителями заряда в гибридных структурах и могут быть использованы при разработке управляемых магнонных устройств – направленных ответвителей, переключателей, усилителей и элементов магнонной логики. Перспективы дальнейших исследований связаны с учётом возможных неоднородности параметров структуры, температурных эффектов, а также экспериментальной реализацией и тестированием предсказанных режимов в реальных феррит-полупроводниковых структурах.

Список использованных источников

1. Спиновые волны // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017); <https://old.bigenc.ru/physics/text/4247484> Дата обращения: 27.05.2026.
2. Никитов С. А. и др. Магноника — новое направление спинтроники и спин-волновой электроники // Успехи физических наук. — 2015. — Т. 185. — №. 10. — С. 1099–1128.
3. Киндяк А. С. Нелинейные поверхностные магнитостатические волны в феррит-полупроводниковой структуре // Журнал технической физики. — 1999. — Т. 69. — С. 119–121.
4. Gaur S. S., Marinero E. E. Emergent Magnonic Materials: Challenges and Opportunities // Materials. — 2023. — Vol. 16, No. 18. — P. 6299.
5. Митлина Л. А., Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Анализ характеристик МСВ, распространяющихся в ферритовых пленках // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. — 2004. — № 27. — С. 25–32.
6. Шавров В. Г., Щеглов В. И. Магнитостатические волны в неоднородных полях. — Москва : Физматлит, 2020. — 335 с.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. — Москва : Гостехиздат, 1957. — Т. 68.
8. Вашковский А. В., Стальмахов В. С., Шараевский Ю. П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. — Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1993. — 311 с.
9. Шнайдер Б. Взаимодействие спиновых волн и электронов в гибридной структуре ЖИГ–InSb // Applied Physics Letters. — 1968. — Т. 13, № 12. — С. 405–407.
10. Wigen P. E. Nonlinear Phenomena and Chaos in Magnetic Materials. — Singapore : World Scientific Publishing Company, 1994. — 260 p.
11. Морозова М. А., Матвеев О. В. Резонансные и нелинейные явления при распространении магнитостатических волн в мультиферроидных,

полупроводниковых и металлизированных структурах на основе ферромагнитных плёнок и магнонных кристаллов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2022. — Т. 30, № 5. — С. 534–553.

12. Казаков Г. Т., Филимонов Ю. А. Взаимодействие магнитостатических волн с носителями тока в слоистых структурах // Известия высших учебных заведений. Физика. — 1989. — Т. 32, № 1. — С. 3–21.

13. Морозова М. А., Лобанов Н. Д., Матвеев О. В. Влияние нелинейности на брэгговские резонансы в связанных магнонных кристаллах // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2024. — Т. 32. — №. 1. — С. 111-120.