Мета й завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є з'ясування особливостей і вивчення закономірностей відгуку пари вихорів із сильною між’ядерною взаємодією на великосигнальні, нелінійні системи збудження із врахуванням фонових впливів малих неоднорідностей та теплових флуктуацій у системі.

Задля досягнення мети було поставлено та вирішено такі завдання:

Побудувати теоретичну модель для динаміки системи, котра досить точно описує рух ядер вихорів у парі під час великих відхилень від центру рівноваги системи, викликаних, зокрема, резонансним збудженням системи зовнішнім змінним магнітним полем.

З'ясувати причини появи сильного відгуку пари вихорів із паралельними полярностями та антипаралельними хіральностями на низьких частотах, забороненого в лінійній моделі через відсутність магнітного моменту таких коливань.

Розробити модель для опису спостережуваної варіації характеристик експериментальних зразків на основі малих дефектів, встановити процедуру опису таких дефектів за допомогою вимірів резонансних характеристик структур.

Дослідити стабільність та контрольованість бістабільностей системи.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є пари магнітних вихорів у наностовпчиках двох циліндричних наночастинок пермалою, розділених надтонким (1 нм) спейсером немагнітного TaN.

Предмет дослідження - особливості статичних та динамічних властивостей механіки пар магнітних вихорів.

Методи дослідження: задля вирішення поставлених завдань було використано модель Тіле для побудови рівнянь руху в розрахованих магнітостатичних потенціалах та метод комплексних амплітуд для знаходження аналітичних відгуків; для симуляції теплових впливів використано флуктуаційно-дисипаційно теорему. Чисельну симуляцію початкових рівнянь руху й Монте-Карло симуляцію стохастичних рівнянь було проведено на основі стандартних функцій Wolfram Mathematica. В експерименті використано тунельний магнітоопір для встановлення експериментальних спектрів. Використано мікромагнітне моделювання рівнянь Ландау-Ліфшиця-Гільберта за допомогою програми Mumax3. Аналіз експериментальних та мікромагнітних даних здійснювався із застосуванням теоретичних моделей, побудованих у цій дисертаційній роботі.

Наукова новизна одержаних результатів

Основними науковими результатами, що виносяться на захист, є такі:

Знайдено, що зовнішнє змінне поле збуджує колову гірацію пари вихорів у протифазі. Виміряно спектральні характеристики, котрі мають декілька виражених резонансних піків. Отримано простий точний аналітичний вираз амплітуди такого руху в моделі рівнянь Тіле. У межах цієї моделі дано пояснення експериментальних спектрів. Зокрема, зазначено сильну залежність частоти резонансу від амплітуди поля через локалізацію потенціалу взаємодії вихорів. Знайдений у системі, ізольований резонанс описує спостережений низькочастотний пік.

Показано, що можливе виникнення бістабільного стану в системі з прикладенням постійного магнітного поля. Уперше обговорено використання цього ефекту для створення нового типу високошвидкісної енергозберігаючої пам'яті на магнітних вихорах. Теоретично передбачено суттєве зменшення часу життя метастабільного стану за умови врахування слабкої нелінійної міжмодової взаємодії.

Показано, що завдяки змінному полю можна керувати бістабільним станом. Знайдено, що можна добитись селективного перемикання станів, збуджуючи систему на частотах, близьких до власних. Спостережуваний під час експерименту асиметричний хід смуги частот перемикання з амплітудою пояснено в межах оригінальної моделі. Показано, як слабкі теплові флуктуації зміщують оптимальну частоту перемикання вгору через теплове збудження вихорів із граничного циклу. Аналітично й чисельно виявлено появу режиму з динамічним хаосом під дією допорогових полів.

Показано можливість перемиканні бістабільних станів із використанням коротких імпульсів, іноді коротших за період власних коливань системи. Підтверджено експериментально, чисельно та аналітично немонотонну залежність розкиду часів перемикання від амплітуди, довжини та форми імпульсів через наявність хаотичних режимів динаміки. Спостережувану чутливість до параметрів коротких імпульсів пояснено інерційною динамікою системи.

Виявлено, що значна частина зразків, використаних у нашому експерименті, має дефекти, котрі призводять до зміщення вихрової пари з геометричного центра частинок в основному стані через пінінг. Уперше показано високу чутливість пари вихорів до пінінгу на дефектах, значно більшу, ніж для окремого вихора. Надано класифікацію дефектів окремо за впливами (зміщення основного стану, створення метастабільного стану, або дефекти, які ніяк не зв'язують вихори) і за гіпотетичною природою (дефекти матеріалу чи дефекти геометрії частинок). Запропоновано аналітичну модель для кількісного опису зміни високочастотного відгуку системи під час зв'язування на обговорених дефектах, уперше враховано можливість суттєвої зміни гіроконстанти. Експериментально продемонстровано можливість використання цього підходу для неруйнівного контролю дефектів у реальних зразках.