

Моделирование спин-волновых устройств в программе Ansys HFSS

А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, И.Е. Кустов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе исследовалась возможность моделирования спин-волновых устройств в среде электродинамического моделирования Ansys HFSS. Исследованы передаточные характеристики спин-волновой линии задержки для различных направлений поля подмагничивания и толщин пленки феррита. Проведено сравнение результатов, полученных в рамках электродинамического моделирования с результатами, полученными при помощи аналитической модели.

Ключевые слова: метод конечных элементов, спиновые волны, линии задержки

1. Введение

Ферритовые материалы нашли широкое применение в технике СВЧ при создании различных “классических” невзаимных и/или управляемых устройств, таких, как циркуляторы, вентили, фазовращатели, линии задержки, резонаторы и фильтры на их основе. Одним из наиболее интересных с точки зрения применения “неклассических” ферритов являются устройства, использующие в основе своей работы монокристаллические пленки феррита в которых могут распространяться волны прецессии намагниченности, т.н. спиновые волны. На основе спин-волновых элементов могут быть созданы различные перестраиваемые магнитным полем СВЧ устройства в том числе вентили, линии задержки, фильтры, фазовращатели, элементы СВЧ-логики и пр. [1,2]. В данный момент наибольшее коммерческое распространение получили спин-волновые фильтры, работающие в диапазоне 2 – 14 ГГц [3-5]. Одним из ограничивающих факторов применения спин-волновых устройств является сложность расчета таких приборов.

Ферритовые устройства удобно рассчитывать целиком с учетом всех элементов конструкции при помощи электродинамического моделирования. Наибольшее распространение получили программные пакеты, использующие в своей основе метод конечных элементов, такие как CST studio, Keysight ADS, ANSYS HFSS, COMSOL Multiphysics. Несмотря на то, что возможность расчета спиновых волн в данных пакетах не декларируется разработчиками, программы позволяют рассчитывать распространение переменных магнитных полей и в тонких пленках ферритов.

В данной работе приводятся результаты моделирования передаточных характеристик линий задержки на основе пленки монокристалла феррита, полученные в программном пакете ANSYS HFSS.

2. Исследуемая конструкция и результаты моделирования

Для моделирования была выбрана конструкция спин-волновой линии задержки [6]. Для возбуждения и приема сигнала в пленке феррита были использованы короткозамкнутые микрополосковые антенны. Ширина антенн w и расстояние между антеннами s составляли 50 и 2500 мкм, соответственно. Сверху над микрополосковыми антеннами помещался волновод из пленки феррита. При моделировании в качестве материала феррита был выбран монокристалл железо-иттриевого граната (ЖИГ), как наиболее часто используемый при создании спин-

волновых устройств. При моделировании полагалось, что намагниченность насыщения ЖИГ составляла $M=1750$ Гс, а полуширина кривой ферромагнитного резонанса ΔH , была равна 0.5 Э. Чтобы избежать отражения волн от концов волновода, окончания волновода были сделаны под скос. При расчете задавались величина и направление постоянного магнитного поля внутри пленки ЖИГ. При расчете полагалось, что магнитное поле имело напряженность $H=1200$ Э.

Во время моделирования шаг сетки определялся программой автоматически, исходя из заданных критериев сходимости. Поскольку на частоте построения сетки шаг сетки зависел от длины волны, распространяющейся в структуре, то для ферритовой пленки размерами $0,5 \times 2 \times 0.005$ мм³, в которой распространяются спиновые волны, число тетраэдров, необходимое для расчета, превышает 400 000.

На рисунке 1 приведены результаты моделирования передаточных характеристик спин-волновых линий задержки. Результаты на рисунке 1,а соответствуют случаю, когда постоянное магнитное поле было направлено в плоскости пленки вдоль антенн спиновых волн. Таким образом, данная ситуация соответствовала случаю распространения поверхностных спиновых волн в пленке феррита. Из рисунка видно, что коэффициент передачи макета имеет явно выраженный максимум, начинающийся выше частоты $f_p = (\gamma H(\gamma H + \gamma M))^{1/2}$ (здесь γ – гиромагнитное отношение), что соответствует началу спектра поверхностных спиновых волн. Далее с ростом частоты данный максимум спадает в соответствии с теорией возбуждения спиновых волн [7]. Кроме того, как и в реальных устройствах на спиновых волнах, коэффициенты передачи являлись невзаимными. Разница между коэффициентами передачи в прямом и обратном направлении составила более 20 дБ.

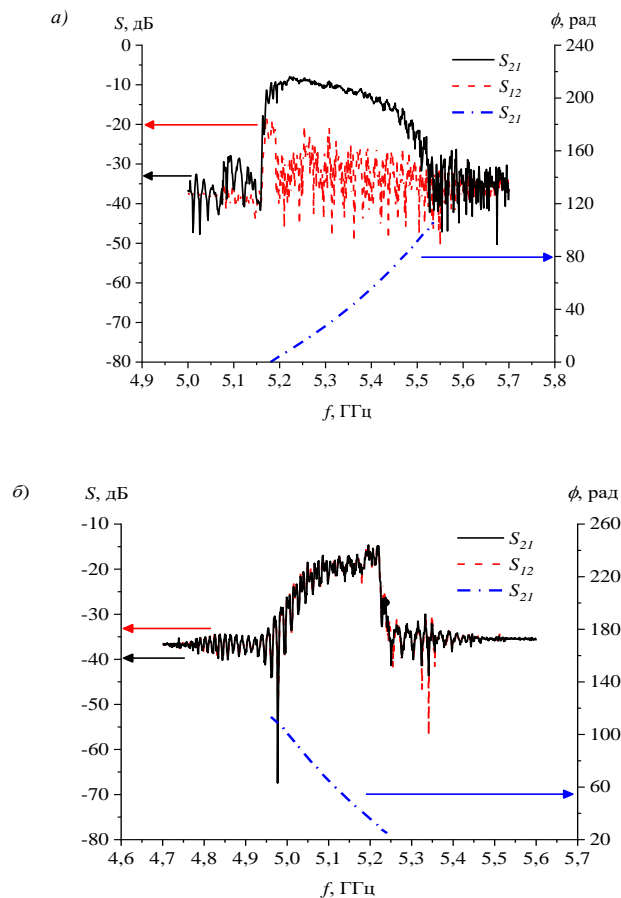


Рисунок 1. Передаточные характеристики спин-волновой линии задержки для случая поверхностных спиновых волн (а) и обратных объемных спиновых волн (б).

Результаты на рисунке 1,б соответствуют случаю, когда постоянное магнитное поле было направлено в плоскости пленки вдоль направления распространения спиновых волн. Из рисунка видно, что в соответствии с теорией [6] коэффициент передачи макета имеет явно выраженный максимум, начинающийся ниже частоты f_p , что соответствует началу спектра спиновых волн. Далее по мере уменьшения частоты данный максимум спадает в соответствии с теорией возбуждения спиновых волн. В данном случае, в соответствии с теорией распространения спиновых волн коэффициенты передачи в прямом и обратном направлении были идентичными.

На рисунке 2,а приведены результаты расчета фазо-частотных характеристик $\phi_{\text{HFSS}}(f)$, спин-волновых линий задержки для случая поверхностных спиновых волн в программе ANSYS HFSS, соответствующих различным значениям толщины пленки монокристалла феррита L . Дисперсионные характеристики, показанные на рисунке 2,б соответствуют пленкам тех же толщин, полученным по аналитической теории [6]. Из сопоставления рисунков видно качественное соответствие между полученными частотными зависимостями. Сопоставление приведенного закона дисперсии, полученного, как $K(f) = \phi_{\text{HFSS}}(f)/s$, показало незначительное (до 10%) расхождение результатов, полученных путем электродинамического моделирования и путем расчета по аналитической теории. Данное расхождение объясняется тем, что при моделировании учитывалась конечная ширина пленки ЖИГ, подводящие линии и волны, отраженные от концов волновода спиновых волн.

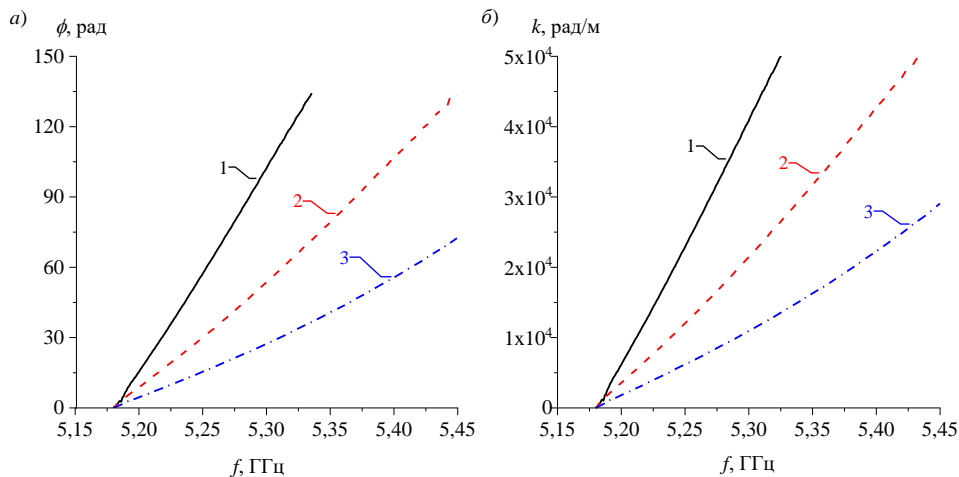


Рисунок 2. Фазо-частотные характеристики, полученные в результате электродинамического моделирования (а) и дисперсионные характеристики, полученные на основе аналитической теории (б) для трех толщин пленки: 1 – $L=2.5$ мкм; 2 – $L=5$ мкм; 3 – $L=10$ мкм.

3. Заключение

Представленные результаты электродинамического моделирования хорошо согласуются с результатами, полученными при помощи аналитической теории, из чего можно сделать вывод о том, что пакет программного обеспечения Ansys HFSS является пригодным для моделирования различных спин-волновых устройств.

Исследование выполнено при частичной поддержке **гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0788-2020-0005)**.

Список литературы

1. Prabhakar A., Stancil D. D. Spin waves: Theory and applications. – Springer US, 2009. – Т. 5.
2. Калиникос Б. А., Устинов А. Б. Сверхвысокочастотные волны в пленочных ферромагнитных структурах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 120с.

3. Перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры // Завод "Магнетон" URL: <http://www.magneton.ru/cat.php?id=104> (дата обращения: 30.05.2020).
4. Продукция АО "НПП "ФАЗА" // АО "НПП "ФАЗА" URL: <http://faza-don.ru/products> (дата обращения: 30.05.2020).
5. Геворкян В., Кочемасов В., Устинов А. Перестраиваемые по частоте СВЧ-фильтры на основе ферритовых материалов. Часть 2 // Компоненты и технологии. – 2017. – №. 3. – С. 16-21.
6. Калиникос Б. А., Устинов А. Б., Баруздин С. А. Спин-волновые устройства и эхо-процессоры // Радиотехника. – 2013. – Т. 216.
7. Дмитриев В. Ф., Калиникос Б. А. Самосогласованная теория возбуждения спиновых волн микрополосковой антенной в касательно намагниченной слоистой структуре // Радиотехника и электроника. – 1988.