

Пленочные ферромагнетики и мультиферроики: физика волновых явлений и применения в микроэлектронике СВЧ

Рассматриваются сверхвысокочастотные (СВЧ) волновые явления в пленочных ферромагнетиках и слоистых гетероструктурах ферромагнетик-сегнетоэлектрик (иными словами - в мультиферроиках) с позиций их применения в микроэлектронике СВЧ.

Ключевые слова: электромагнитно-спиновые волны, ферритовые пленки, пленочные гетероструктуры, мультиферроики, СВЧ приборы

Физические исследования и технические приложения сверхвысокочастотных (СВЧ) спин-волновых явлений в ферромагнитных пленках и пленочных слоистых структурах, построенных на основе ферромагнитных пленок, привели в 70-х – 80-х годах прошлого века к появлению нового научно-технического направления функциональной СВЧ микроэлектроники, получившего название *спин-волновая электроника* [1]. В англоязычных странах соответствующее научно-техническое направление обычно называют “magnetostatic wave technology” [2].

Наиболее часто в качестве «рабочего материала» в спин-волновых приборах используются монокристаллические феррогранаты, в частности, железо-иттриевый гранат (ЖИГ), что обусловлено рекордно низкими потерями на распространение спиновых волн в ЖИГ. Кроме пленок ЖИГ в последние годы в качестве материала для построения СВЧ спин-волновых приборов исследуются также тонкие пленки металлических магнетиков (см., например, [3]).

Принцип действия спин-волновых приборов основан на явлениях возбуждения, распространения и приема СВЧ спиновых волн (СВ) или, как их часто называют, магнитостатических волн (МСВ). Физически эти волны являются волнами намагниченности, существующими в магнитоупорядоченных кристаллах. Такие волны могут возбуждаться в широком диапазоне частот (от сотен мегагерц до десятков гигагерц). Они относятся к классу медленных электромагнитных волн, поскольку их фазовые скорости значительно меньше скорости света.

С позиций физики, сравнительная простота возбуждения и приема спиновых волн, многообразие их дисперсионных характеристик, низкое затухание на длину волны, «доступность» волн с поверхности на всем пути их распространения сделали ферромагнитные пленки уникальными объектами как для изучения собственно спин-волновых процессов, так и для моделирования волновых явлений в диспергирующих средах вообще. С позиций техники, ферромагнитные пленки стали материалом, используемым для построения различных приборов и устройств, принцип действия которых основан на распространении и взаимодействии линейных и нелинейных спиновых волн и на пространственно распределенном вводе (съеме) рабочего сигнала (подобно приборам на поверхностных акустических волнах (ПАВ)).

Одной из существенных особенностей спин-волновых приборов по сравнению со многими другими приборами СВЧ микроэлектроники является возможность *электронного управления* их рабочими характеристиками, в частности, как центральной частотой, так и диапазоном рабочих частот. Эта технически важная особенность реализуется путем изменения поля подмагничивания, что приводит к изменению дисперсионных характеристик несущих спиновых волн. Необходимо отметить, что такое изменение легко осуществляется как на всем пути распространения волн, так и локально.

В последние годы внимание исследователей обращено также к изучению многофункциональных материалов, сочетающих в себе несколько полезных качеств. К одному из таких направлений относится исследование *мультиферроидных* материалов и структур, объединяющих в себе сегнетоэлектрические (или пьезоэлектрические) и ферромагнитные (или магнитострикционные) свойства. Возможность изменения волноведущих свойств структуры как помощью электрического, так и магнитного поля открывает широкие возможности для разработки принципиально новых СВЧ микроэлектронных приборов с *двойным электронным управлением* рабочими характеристиками (магнитным и электрическим управлением) в широком частотном диапазоне.

Как показывает обзор литературы, существует два направления исследования композитных мультиферроиков в виде феррит-сегнетоэлектрических структур. Эти направления отличаются физической сущностью эффектов, на которых базируется электронная перестройка СВЧ параметров мультиферроика. Один из них – это магнитоэлектрический эффект, а другой – электродинамический эффект. Магнитоэлектрический эффект обусловлен взаимодействием кристаллических решеток феррита и сегнетоэлектрика [4]. Электрическое поле, приложенное к сегнетоэлектрику, благодаря пьезоэлектрическому эффекту вызывает его деформацию. При наличии механического контакта это напряжение передается слою феррита, в котором в результате магнитострикционного эффекта изменяется намагниченность. При этом изменяются и характеристики рабочих спиновых волн.

Второе направление исследований композитных мультиферроиков опирается на электродинамический эффект. Электродинамический эффект проявляется благодаря связи ферритового и сегнетоэлектрического слоев через взаимодействие их СВЧ электромагнитных полей [5,6]. При этом слои могут быть не связаны механически. Именно на таком электродинамическом эффекте и базируется второй тип электронной перестройки. Существенное отличие электродинамического эффекта от магнитоэлектрического эффекта заключается в том, что в слоистой структуре феррит-сегнетоэлектрик изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика позволяет реализовать управление дисперсией волн, распространяющихся в гетероструктуре (см., например., обзорную статью [7] и литературу в ней).

Данный доклад, с одной стороны, посвящен описанию основных свойств СВЧ волновых процессов в пленочных ферромагнетиках и мультиферроиках, а, с другой стороны, их применению в линейных, нелинейных и гибридных микроэлектронных устройствах аналоговой обработки СВЧ сигналов. Примеры технического приложения

как ферромагнитных, так мультиферроидных устройств иллюстрируют исследования, выполненные на кафедре физической электроники и технологии СПбГЭТУ.

В заключение отметим, что, как показывают теоретические исследования, одним из перспективных направлений изучения как ферромагнитных, так и мультиферроидных приборов, обеспечивающих продвижение их рабочих частот вплоть до терагерцового диапазона, является применение высокоанизотропных магнитных материалов, например, пленок гексаферритов бария и стронция. Однако на этом пути предстоит еще решить ряд технологических задач по выращиванию пленок с требуемыми характеристиками.

Библиографический список

1. Физика спин-волновых процессов в ферромагнитных пленках и слоистых структурах / Изв. вузов СССР. Сер. «Физика». Тематич. вып. 1988. Т. 31, № 11.
2. D.D. Stancil, A. Prabhakar, Spin Waves: Theory and Applications, Springer, 2009.
3. Yu. Khivintsev, J. Marsh, V. Zagorodnii, et al. Nonlinear amplification and mixing of spin waves in a microstrip geometry with metallic ferromagnets. Appl. Phys. Lett., 2011, vol. 98, pp. 042505-7.
4. U. Ozgur, Ya. Alivov, H. Morkoc, Microwave ferrites, part 2: Passive components and electrical tuning. J. Mater Sci: Mater. Electron., 2009. vol. 20, pp. 911–952.
5. В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос, Спектр дипольно-обменных спиновых волн в касательно намагниченных слоистых структурах металл-сегнетоэлектрик-ферромагнетик-сегнетоэлектрик-металл. Письма в ЖТФ. 2000, Т.26, Вып. 7, С.8-17.
6. V. E. Demidov, B. A. Kalinikos, P. Edenhofer. Dipole-exchange theory of hybrid electromagnetic-spin waves in layered film structures. J. Appl. Phys. 2002. V.91. pp. 10007-10.
7. Ce-Wen Nan, M. I. Bichurin, Shuxiang Dong, et al. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions J. Appl. Phys. Vol. 103, 031101 (2008).