

**Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г.**  
 Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
 им. В.А. Котельникова РАН

## Прохождение сверхнаправленного пучка поверхностных спиновых волн через слабоконтрастный магнетонный кристалл

*Рассмотрено распространение пучка спиновых волн (СВ) через слабоконтрастный магнетонный кристалл, создаваемый в плёнке железо-иттриевого граната (ЖИГ) пространственно-периодическим магнитным полем. Получены картины распределения амплитуды пучка поверхностных СВ при их распространении до и после взаимодействия с магнетонным кристаллом. Показано, что взаимодействие пучка с магнетонным кристаллом носит резонансный характер. В результате взаимодействия на выходе формируется множество пучков, смещенных и преломленных относительно исходного пучка. Расположение и количество возникших пучков сильно зависит от частоты.*

**Ключевые слова:** спиновые волны, слабоконтрастный магнетонный кристалл, Брэгговская дифракция, ферритовая пластина.

Взаимодействие спиновых волн с магнетонными кристаллами ранее рассматривалось в ряде работ, например [1, 2].

Геометрия задачи представлена на рис. 1. Магнетонный кристалл формировался наложенными на пластину ЖИГ отрезками магнитофонной ленты, на которых был записан синусоидальный периодический сигнал. Для совмещения максимумов записанных на ленту синусоидальных сигналограмм использовался метод визуализации магнитных доменов, наведенных магнитофонной записью, основанный на фарадеевском вращении и подробно описанный в [3].

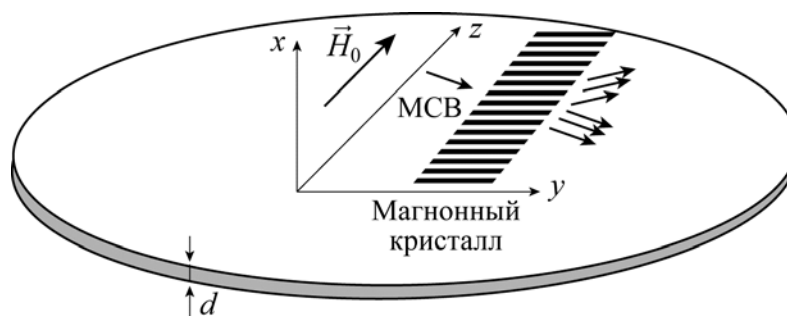


Рис. 1. Геометрия задачи

Для создания сверхнаправленного пучка СВ выбиралось такое направление групповой скорости (относительно магнитного поля), при котором дифракционная расходимость луча на данной частоте была минимальной [4]. В данном случае возбуждающий преобразователь в виде линейного СВЧ-тока ориентировался под углом около  $45^\circ$  к полю подмагничивания, при котором на частотах возбуждения около 3000 МГц в плёнке ЖИГ возбуждались слабо расплывающиеся лучи поверхностных СВ.

На пути распространения пучка СВ располагался участок магнетонного кристалла, созданного магнитофонными лентами. При взаимодействии с магнетонным кристаллом одна часть энергии волны дифрагировала на периодической структуре кристалла, в результате чего образовывалась волна с новым направлением групповой скорости, а другая часть волны проходила дальше. Продифрагировавшая волна в свою очередь подвергалась повторной дифракции, образуя волну с исходным направлением. Таким образом, на выходе присутствовало множество как смещенных лучей с тем же направлением, так и продифрагировавших лучей, имеющих другое направление. Полученная картина сильно зависела от частоты и от направления вектора решётки кристалла. Кристалл позволял менять параметры прошедшей волны: количество лучей, их направления, амплитуды и так далее.

Распределения полей СВ измерялись щупом в виде микропетли, который сканировал плоскость плёнки в двух взаимно перпендикулярных направлениях – Y и Z [5]. Во время эксперимента использовалась развертка по частоте, позволяющая измерять комплексный коэффициент передачи сразу в некотором диапазоне частот. Измеряемые величины оцифровывались с помощью АЦП и передавались на компьютер. Каждый отсчет содержал информацию о реальной и мнимой компонентах комплексного коэффициента передачи, координатах  $y$  и  $z$  щупа и текущего значения частоты. Обработка полученных данных на компьютере с помощью специально разработанного алгоритма позволила извлекать распределения комплексного коэффициента передачи по поверхности ферритовой пластины для любой частоты из сканируемого диапазона.

На рис. 1 представлены картины дифракции сверхнаправленного пучка на магнетонном кристалле, вектор решётки  $\mathbf{q}$  которого ориентирован параллельно полю подмагничивания. Величина вектора  $\mathbf{q}$  была выбрана так, чтобы для падающего луча были сформированы условия, близкие к созданию брэгговской дифракции [6]. Брэгговская дифракция является эффектом, резко зависящим от частоты. Сверхнаправленность ПСВ также имеет достаточно заметную частотную зависимость [4]. В результате при небольшом изменении частоты (около 100 МГц) в образце ферритовой плёнки ЖИГ наблюдается целый набор совершенно разных распределений волн.

На рис. 1,а представлена картина, в наибольшей степени соответствующая режиму брэгговской дифракции сверхнаправленного луча. Виден узкий хорошо сформированный падающий луч слева от магнетонного кристалла. Справа от кристалла наблюдаются два луча, распространяющиеся в разные стороны симметрично относительно некоторой горизонтальной оси. Это прошедший основной луч нулевого порядка дифракции и продифрагировавший брэгговский луч первого порядка. Отметим, что основной луч оказался сдвинутым вверх относительно исходного падающего луча и оба прошедших луча за счёт взаимодействия с периодической структурой кристалла оказались гораздо шире падающего луча.

С увеличением частоты начинается процесс дифракционного расплывания падающего луча, при этом перестают выполняться условия брэгговской дифракции для основной части падающего луча, но зато за счёт дифракционного расплывания появляются компоненты луча, для которых эти условия ещё выполняются. На рисунках 1,б–е показана трансформация дифракционной картины при изменении частоты. На рис. 1,б появляется второй луч первого порядка дифракции. На рис. 1,в этот второй луч становится преобладающим, а первый практически пропадает, прошедший луч нулевого порядка дифракции сдвигается ближе к положению исходного луча. На рис. 1,г лучи первого порядка становятся еле заметными, но зато появляются много сравнительно слабых дублёров у лучей первого и второго порядка дифракции. Наконец на рис 1,д и 1,е видно, как развивается этот процесс появления дублёров – всё поле плёнки ЖИГ покрывается тонкими полосками продифрагировавших лучей.

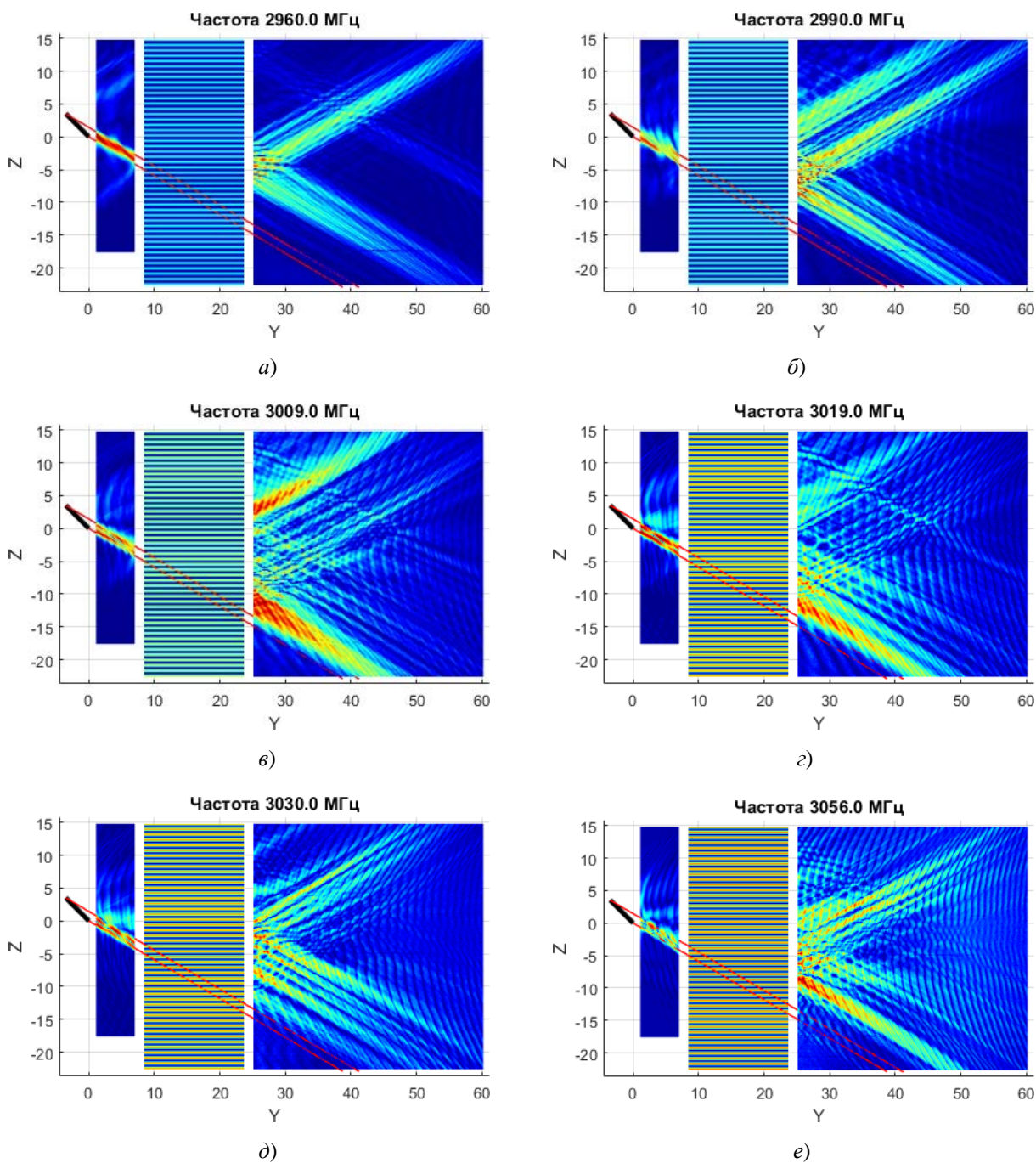


Рис. 2. Двухмерные распределения амплитуды поверхностных СВ при их дифракции на слабоконтрастном магнотом кристалле для разных частот (а–е). Оси  $YZ$  лежат в плоскости плёнки ЖИГ, размеры указаны в миллиметрах. Поле подмагничивания величиной  $500 \text{ Э}$  направлено вдоль оси  $Z$ . Намагниченность насыщения  $4\pi M = 1850 \text{ Гс}$ , толщина ферритовой плёнки  $h = 15 \text{ мкм}$ . Чёрный отрезок изображает линейный СВЧ-ток, являющийся возбуждающим преобразователем. Красные линии, идущие от преобразователя, соответствуют распространению луча СВ при отсутствии магнотомного кристалла. Магнотомный кристалл показан в виде прямоугольника, заполненного чередующимися полосами, шаг которых равен периоду решётки  $810 \text{ мкм}$ . Цветовая гамма распределения СВ соответствует увеличению амплитуды СВ от синего (малая амплитуда) до красного (большая амплитуда).

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило наличие сильного взаимодействия СВ с магнетонным кристаллом на частоте, при которой выполняются условия брэгговской дифракции. Полученное разнообразие распределений для разных частот говорит о сложном механизме взаимодействия, требующем дальнейших исследований.

#### Библиографический список

1. Анненков А.Ю., Герус С.В. 2-D распределение магнитостатических волн в окрестности зоны непропускания магнетонного кристалла // Труды XXI Международной конференции «Электромагнитное поле и материалы». 15–17 ноября 2017. М.: МЭИ. С. 113–117.
2. Анненков А.Ю., Герус С.В. Дисперсионные свойства магнетонного кристалла с невзаимностью // Известия РАН. Сер. Физическая. 2017. Т. 81. № 8. С. 1091–1094.
3. Герус С.В., Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Чижик Е.С. Способ определения напряженности статического периодического магнитного поля / А.с. №1396761. Оpubл. в Б.И. 1989. № 39. С. 278.
4. Локк Э.Г. Угловая ширина луча при дифракции на щели волны с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями // УФН. 2012. Т. 182. № 12. С. 1327–1343.
5. Анненков А.Ю., Герус С.В. Исследование распределения поверхностных магнитостатических волн путем сканирования поверхности ферритовой пластины // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 5. С. 572–577.
6. Герус С.В. Магнитостатические волны в пространственно-периодических и двумерно-неоднородных магнитных полях / Диссертация и Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва. 2010.