

Сверхнаправленное распространение луча поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пленке

Экспериментально исследованы дифракционные картины лучей поверхностной спиновой волны, возбуждаемой линейным преобразователем в касательно намагниченной ферритовой пленке. Найдено, что угловая ширина луча спиновой волны может быть, как больше, так и меньше величины λ_0/D , где λ_0 – длина возбуждаемой спиновой волны, D – длина преобразователя. Реализована геометрия, при которой в пленке возникает сверхнаправленный нерасширяющийся луч, сохраняющий свою абсолютную ширину по мере распространения и имеющий угловую ширину, близкую к нулю. Полученные результаты хорошо согласуются как с численными теоретическими расчетами, так и с расчетами угловой ширины лучей по общей аналитической формуле, полученной ранее.

Ключевые слова: ферритовая плёнка, спиновая волна, визуализированная дифракционная картина, угловая ширина луча, сверхнаправленный нерасширяющийся луч

Недавно в магнитостатическом приближении была решена общая двумерная задача по дифракции на произвольно ориентированной щели поверхностной спиновой волны с неколлинеарной ориентацией волнового вектора \mathbf{k}_0 и вектора групповой скорости \mathbf{V}_0 [1, 2]. В результате решения этой задачи было установлено, что угловая ширина возникающих дифракционных лучей зависит не только от отношения длины падающей спиновой волны λ_0 к длине щели D (как в изотропных средах), но и от математических свойств изочастотной зависимости спиновой волны, падающей на щель. Было показано, что когда волновой вектор исходной спиновой волны \mathbf{k}_0 ориентирован нормально линии щели, то, как с математической, так и с физической точки зрения рассматриваемая дифракционная задача эквивалентна (при определенных условиях¹) задаче по возбуждению спиновой волны с помощью линейного преобразователя длиной D . В итоге проведенных исследований для случая $D \gg \lambda_0$ была получена общая формула, описывающая зависимость угловой ширины каждого дифракционного луча от параметров исходной (падающей на щель или возбуждаемой преобразователем) спиновой волны, от параметров анизотропной среды, а также от длины и ориентации щели. Из полученной формулы следовало, что угловая ширина дифракционного луча в анизотропных средах может быть не только больше или меньше величины λ_0/D (λ_0 – длина исходной плоской волны, D – длина возбудителя), но при определенных условиях угловая ширина луча может быть равна нулю. Также в [2] было показано, что с помощью этой формулы можно вычислять угловую ширину луча для спиновых волн других типов² и для волн иной природы в различных анизотропных средах и структурах.

С целью подтверждения результатов, описанных выше, в данной работе экспериментально исследованы дифракционные картины лучей поверхностной спиновой волны в касательно намагниченной ферритовой пленке для ряда геометрий, в том числе для

¹ Подробнее эти условия изложены в разделе 9 в [2].

² На основе полученной формулы в [3] была рассчитана угловая ширина луча обратной спиновой волны.

случая, когда угловая ширина луча может быть равна нулю.

Распределение энергии лучей спиновой волны в плоскости ферритовой пленки исследовалось методом зондирования, использованным ранее в работах [4 – 6]. Недавно этот метод был значительно усовершенствован и теперь он позволяет исследовать и визуализировать пространственное распределение амплитуды и фазы спиновых волн в плоскости ферритовой пленки на основе компьютерной обработки измеренных амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик исследуемых волн (подробнее методика измерений описана в [7]).

На рис.1 представлена типичная дифракционная картина (визуализированная по экспериментальным данным), возникающая в пленке при возбуждении спиновой волны с неколлинеарной ориентацией волнового вектора \mathbf{k}_0 и вектора групповой скорости \mathbf{V}_0 .

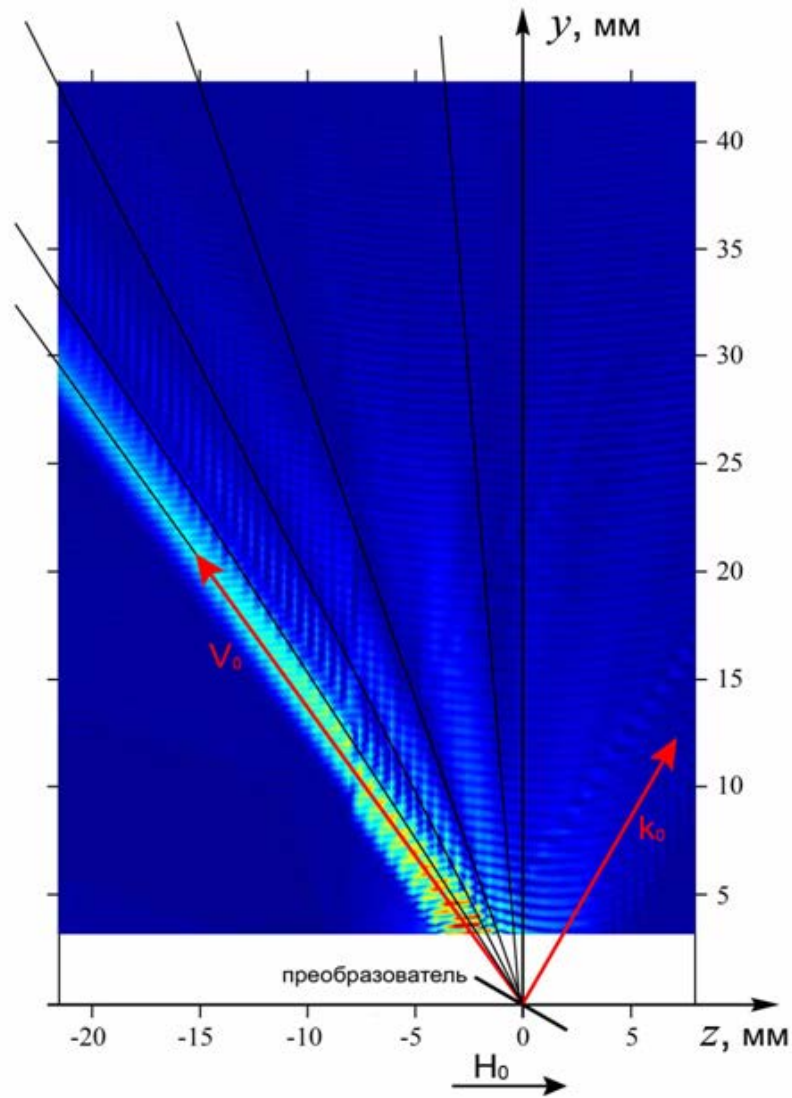


Рис. 1. Экспериментальная дифракционная картина, возникающая в пленке при возбуждении спиновой волны с неколлинеарной ориентацией волнового вектора \mathbf{k} и вектора групповой скорости \mathbf{V} при $\varphi_0 = -30$ градусов и $f = 3242$ МГц. $\lambda_0/D = 0.0696$.

Преобразователь, имеющий длину $D = 5$ мм и толщину 12 мкм, возбуждал спиновую волну с частотой $f = 3242$ МГц, волновым числом $k_0 = 180 \text{ см}^{-1}$ (длиной волны $\lambda_0 = 348$ мкм) и отношением $\lambda_0/D = 0.0696$. Векторы \mathbf{k}_0 и \mathbf{V}_0 были ориентированы, соответственно, под углами $\varphi_0 = -30^\circ$ и $\psi_0 = 36^\circ$ относительно оси коллинеарного распространения y . Приемный

зонд имел апертуру $\sim 0,5$ мм и толщину 12 мкм. Области ферритовой плёнки, где амплитуда пучка спиновой волны максимальна, показаны красным цветом, а области, где эта амплитуда близка к нулю – темно-синим. Изменение цвета на сопредельный цвет на рис. 1 соответствует уменьшению амплитуды волны вдвое.

На рис. 2 представлена соответствующая рис. 1 и рассчитанная на основе теории [2] диаграмма направленности (дифракционная картина), описывающая зависимость амплитуды магнитного потенциала спиновой волны в дальней зоне от полярного угла φ . На рис. 2 показано несколько прямых $\varphi = \text{const}$, вдоль которых амплитуда магнитного потенциала (и амплитуда СВЧ магнитного поля) спиновой волны равна нулю. На рис. 1. также построены прямые, вдоль которых амплитуда близка к нулю. Хорошее совпадение прямых на рис. 1 и 2 свидетельствует о том, что разработанная теория [2] достаточно адекватно описывает дифракционные картины спиновых волн.

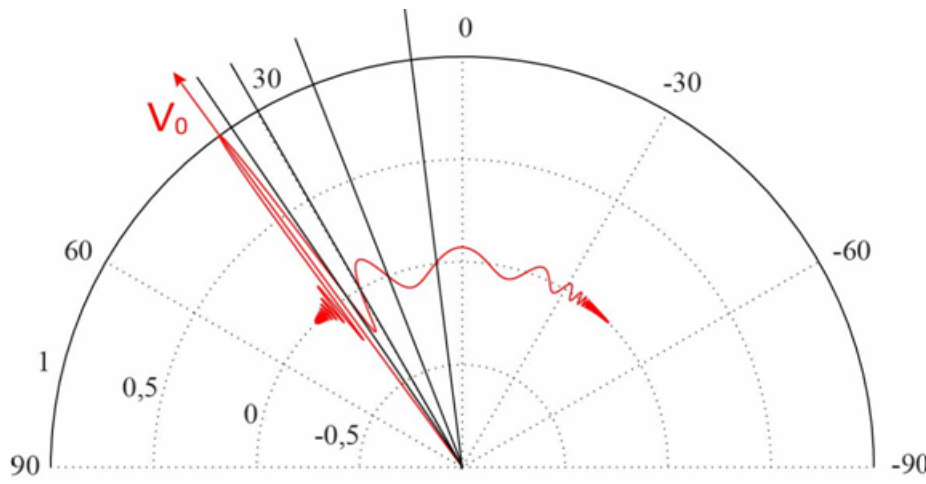


Рис. 2. Теоретическая дифракционная картина (зависимость амплитуды магнитного потенциала спиновой волны в дальней зоне от полярного угла φ), возникающая при возбуждении в пленке спиновой волны с неколлинеарной ориентацией волнового вектора \mathbf{k} и вектора групповой скорости \mathbf{V} при $\varphi_0 = -30$ градусов и $f = 3242$ МГц.

Также для $f = 3242$ МГц были экспериментально исследованы дифракционные картины для коллинеарной волны (когда векторы \mathbf{k} и \mathbf{V} параллельны друг другу и оси y).

Характеризуя угловую ширину луча, удобно определять не саму величину $\Delta\psi$ в градусах, а рассчитывать отношение σ угловой ширины $\Delta\psi$ (в радианах) к величине λ_0/D (угловой ширине луча в изотропной среде в радианах). Очевидно, что по физическому смыслу величина σ является *относительной угловой шириной дифракционного луча*: если $\sigma < 1$ (или $\sigma > 1$), то это означает, что угловая ширина луча $\Delta\psi$ меньше (или больше), чем в изотропных средах.

Определенные экспериментально (по уровню 0.5) величины σ для рис. 1 и для коллинеарной волны оказались равны $\sigma = 0.4$ и $\sigma = 2$ соответственно.

В эксперименте был также исследован случай, при котором, в соответствии с теорией [2], угловая ширина луча спиновой волны должна быть равна нулю, то есть, должен наблюдаться сверхнаправленный (нерасширяющийся), сохраняющий свою абсолютную ширину луч. Экспериментальная дифракционная картина такого луча представлена на рис. 3. Поскольку энергия этого луча локализована вдоль его траектории (расплывание энергии по поверхности ферритовой пленки минимально), то он распространялся на расстояние ~ 50 мм и лишь на расстояниях, больше указанного, принимаемый сигнал ослабевал (из-за наличия естественного затухания) и луч уже сложно было выделить на фоне шума.

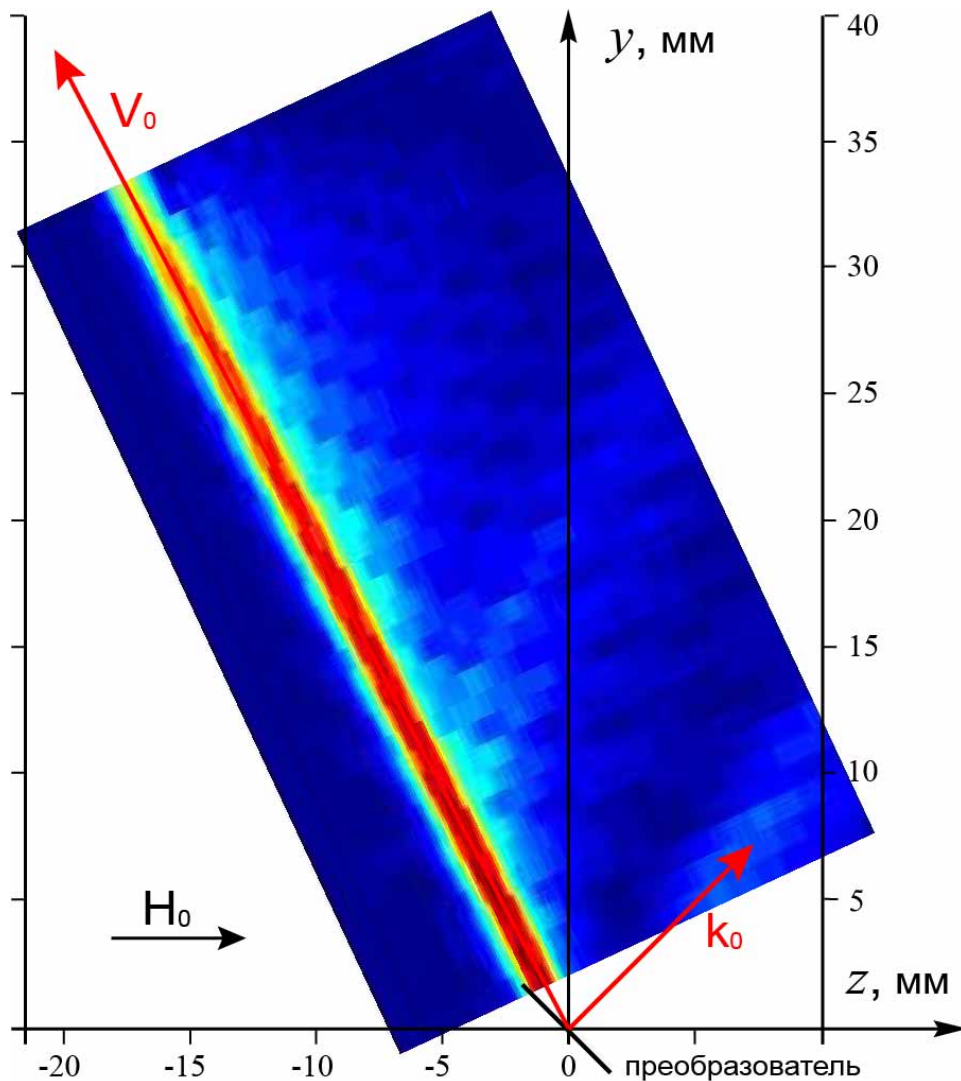


Рис. 3. Экспериментальная дифракционная картина, возникающая в пленке при возбуждении спиновой волны с неколлинеарной ориентацией волнового вектора \mathbf{k} и вектора групповой скорости \mathbf{V} при $\varphi_0 = -45$ градусов и $f = 3000$ МГц. $\lambda_0/D = 0.222$.

Как видно на рис. 3, луч действительно сохраняет свою ширину и амплитуду практически на протяжении всей траектории. Несмотря на то, что для этого луча отношение $\lambda_0/D = 0.222$ больше, чем для луча на рис. 1 ($\lambda_0/D = 0.0696$), измеренная относительная угловая ширина σ для этого луча оказалась равна $\sigma = 0.03$ ($\Delta\psi \approx 0.4^\circ$) что намного меньше, чем для луча на рис. 1 и для луча коллинеарной волны. Для сравнения, в изотропных средах при отношении $\lambda_0/D = 0.222$ волновой пучок имел бы угловую ширину 12.7° (а не 0.4°)! Отметим, что в соответствии с теорией в геометрии, показанной на рис. 3, должен был бы наблюдаться волновой пучок с $\sigma = \Delta\psi = 0$ (а не $\sigma = 0.03$). Этот факт объясняется следующим образом: поскольку апертура приемного зонда равна 0.5 мм, а длина траектории спиновой волны ~ 50 мм, то минимальный угол, который можно при этом измерить, составляет $\sim 0.5/50/2 = 0.005$ рад ≈ 0.3 градуса. То есть, к сожалению, приходится констатировать, что поскольку спиновые волны, в отличие от света, распространяются всего лишь на ~ 50 мм, то при этом с помощью зонда, имеющего апертуру 0.5 мм, можно измерять угловую ширину не более 0.3 градуса. Отметим здесь, что апертура зонда 0.5 мм является наиболее оптимальной (о чем говорит опыт предыдущих исследований, выполненных авторами): если уменьшить апертуру зонда, то амплитуда принимаемого сигнала также уменьшится, и

мы уже не сможем видеть спиновую волну на расстояниях 50 мм (это расстояние тоже уменьшится). Таким образом, и эксперимент и теория показывают, что угловое разрешение ~ 0.3 градуса, по-видимому, является определенным пределом при измерении угловой ширины лучей спиновых волн.

В целом, анализируя результаты, представленные на рис. 1 – 3, можно сделать следующий вывод: угловая ширина лучей поверхностной спиновой волны не является величиной постоянной и, в отличие от угловой ширины лучей в изотропных средах, может быть не только больше или меньше отношения λ_0/D , но может быть даже близка к нулю. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с предсказаниями и теоретическими расчетами на основе работ [1, 2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-07-00332).

Библиографический список

1. Edwin H. Lock. On the Angular Width of Diffractive Beam in Anisotropic Media / E-print Archive of Cornell University, 2010. <http://arxiv.org/abs/1112.3929>.
2. Локк Э.Г. Угловая ширина луча при дифракции на щели волны с неколлинеарными групповой и фазовой скоростями / Успехи физических наук, 2012, т. 182 – №12 – с. 1327-1343.
3. Локк Э.Г. Угловая ширина волнового пучка обратной спиновой волны, возбуждаемой линейным преобразователем в ферритовой пластине / Радиотехника и электроника, 2015. т.60 – №1 – с. 102-106.
4. Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. Распространение поверхностных магнитостатических волн в неоднородном постоянном магнитном поле с профилем типа вала / Радиотехника и электроника, 1990, т. 35 – №8 – с. 1617–1623.
5. Вашковский А.В., Зубков В.И., Локк Э.Г., Щеглов В.И. Распространение поверхностных магнитостатических волн в неоднородном постоянном магнитном поле типа протяженной ямы / ЖТФ, 1990, т. 60. – №7 – с.138-142.
6. Анненков А.Ю., Васильев И.В., Герус С.В., Ковалев С.И. Моды поверхностных магнитостатических волн в канале, создаваемом неоднородным магнитным полем / ЖТФ, 1995, т. 65. – №4 – с.71-82.
7. 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.