

# Распространение СВЧ импульсов в магнетонном кристалле конечной длины

А.В. Дроздовский, Г.А. Зарецкая, Б.С. Савин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** в работе приведены результаты теоретического исследования распространения СВЧ импульсов спиновых волн внутри магнетонной периодической структуры – магнетонного кристалла. Положение несущей импульсов выбиралось так, чтобы несущая сигнала располагалась внутри запрещенных зон магнетонного кристалла. Продемонстрировано, что фильтрация сигнала в частотной области, возникающая за счет подавления сигнала внутри запрещенных зон ведет к искажению и дроблению импульсов во временной области сигнала. Данную особенность можно использовать для получения радиоимпульсов длительностью менее 1 пс.

**Ключевые слова:** спиновые волны, периодические структуры, обработка сигнала

## 1. Введение

В настоящее время возрос научный интерес к исследованию СВЧ свойств магнетонных кристаллов [1]. Магнетонные кристаллы представляют собой периодически модулированные в направлении распространения волноведущие структуры, в которых могут распространяться волны прецессии намагниченности – спиновые волны. Магнетонные кристаллы являются удобным объектом при исследовании распространяющихся линейных и нелинейных волн, поскольку являются нелинейными средами и в них присутствует управления законом дисперсии за счет подбора параметров структуры. Магнетонные кристаллы могут быть использованы в качестве основы для создания новейших устройств для обработки сигнала непосредственно на СВЧ [2]. Главной особенностью спектра магнетонных кристаллов является присутствие полос заграждения, которые появляются за счет Брэгговского резонанса. Известно, что свойствами полос заграждения МК можно управлять при помощи как магнитных, так и электрических полей [3]. Способность магнетонных кристаллов демонстрировать дисперсионные характеристики, радикально отличающиеся от дисперсионных характеристик неструктурированных сред, позволяет использовать их несколько для новых потенциальных применений, включая линии задержки, управляемые током, микроволновые фильтры, магнетонные транзисторы и датчики магнетонного поля.

При исследовании свойств магнетонных кристаллов, как правило, изучается распространение в них спектрально узких (порядка ширины запрещенной зоны) СВЧ импульсов или изучению их передаточных характеристик. В данной работе приведены результаты исследования распространения спектрально широких СВЧ импульсов внутри магнетонного кристалла.

## 2. Объект исследования

Моделируемый магнетонный кристалл представлял из себя одномерную структуру на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) с периодическими изменениями толщины. При моделировании были выбраны следующие параметры структуры. Пленка ЖИГ имела размеры 35 мм в длину, 2 мм в ширину и 8,3 мкм в толщину. Ширина линии ферромагнитного резонанса составляла 0,5 Э. Намагниченность пленки ЖИГ составляла 1850 Э.

Периодичность структуры достигалась путем создания системы канавок, перпендикулярных направлению распространения волн. Канавки имели ширину 70 мкм и глубину 1 мкм. Вдоль направления распространения располагалось 12 канавок с периодом 400 мкм. При расчете предполагалось, что магнетонный кристалл находится в однородном магнитном поле, напряженностью 770 Э, направленном перпендикулярно направлению распространения волн.

### 3. Результаты моделирования

Теоретическое исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе был получен комплексный коэффициент передачи макета, содержащего магнетонный кристалл. Для моделирования были взяты параметры магнетонного кристалла, описанного выше. При расчете учитывалось влияние антенн, возбуждающих и принимающих спиновые волны. Расчет передаточной характеристики производился методом волновых матриц передачи. Такой подход позволил учесть конечность длины магнетонного кристалла. Полученный в результате моделирования коэффициент передачи имел вид:

$$H(f, L) = |H(f, L)| e^{i\varphi(f, L)}, \quad (1)$$

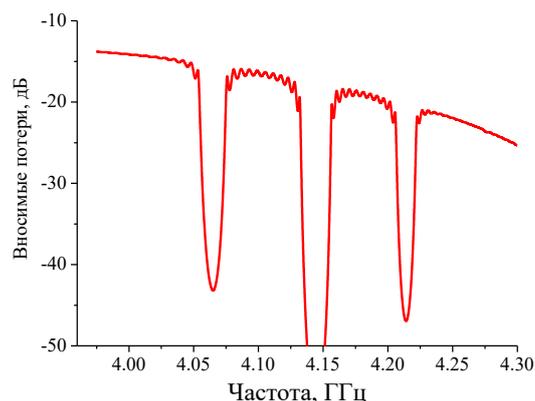
где  $|H(f, L)|$  – вносимые макетом с магнетонным кристаллом потери,  $\varphi(f, L)$  – набег фазы,  $L$  – длина пробега волны в магнетонном кристалле (расстояние между антеннами спиновых волн). Стоит отметить, что вносимые потери и вносимый фазовый набег вблизи частот Брегговских резонансов нелинейно зависят от расстояния  $L$ , как это было показано в [4]. Передаточная характеристика магнетонного кристалла представлена на рисунке 1. Видно, что периодичность волноведущих свойств ведет к образованию нескольких запрещенных зон в спектре спиновых волн.

На втором этапе теоретических исследований изучалось прохождение импульсов через макет с магнетонным кристаллом. Для этого в программной среде MATLAB была написана программа. В программе моделировался прямоугольный СВЧ импульс с заданными длительностью и амплитудой. Далее, импульс подвергался быстрому преобразованию Фурье, в результате чего получалось представление сигнала в частотной области. Полученный спектр умножался на передаточную характеристику (1). При таком подходе модуль коэффициента передачи магнетонного кристалла отвечал за затухание амплитуды спектральной характеристики импульса, а фазо-частотная характеристика кристалла отвечала за разность фаз между спектральными гармониками импульса. На основе полученного спектра путем обратного преобразования Фурье рассчитывалась реализация импульса во временной области. Далее при помощи встроенных в программу функций рассчитывалась огибающая СВЧ сигнала.

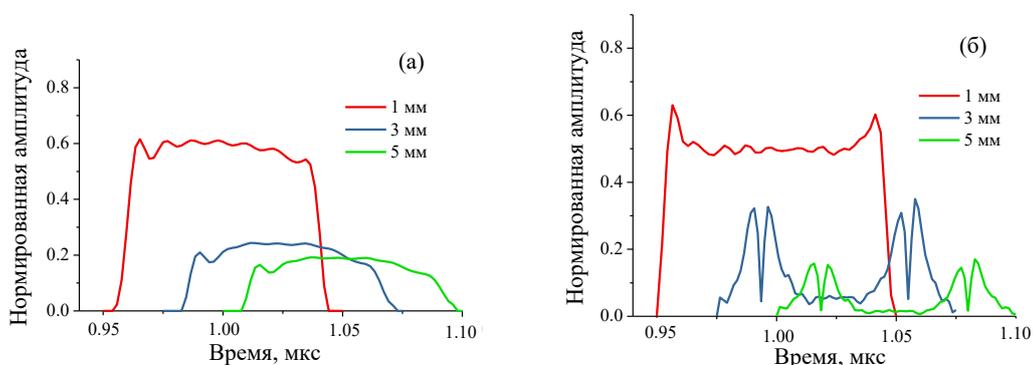
Результаты моделирования распространения импульсов длительностью 100 нс внутри магнетонной периодической структуры приведены на рисунке 2. Различными линиями представлены импульсы, прошедшие различное расстояние в магнетонном кристалле. На рисунке 2,а приведены огибающие СВЧ импульса в случае, когда несущая частота СВЧ импульса равна 4.01 ГГц, иными словами, располагалась вне запрещенных зон магнетонного кристалла (см. рисунок 1). В данном случае дисперсия волноведущей структуры приводило к расплыванию СВЧ импульса. На рисунке 2,б представлены, огибающие с несущей на частоте 4.08 ГГц. Иными словами, в случае, когда несущая располагается внутри запрещенной зоны магнетонного кристалла. В этом случае трансформацию СВЧ импульса можно объяснить следующим образом. Запрещенная зона магнетонного кристалла сильно меняет спектр импульса, подавляя центр спектра импульса и, в частности, его несущую. При этом коэффициент передачи магнетонного кристалла внутри запрещенных зон нелинейно зависит от расстояния. Так,

при распространении импульса на расстояние равное 1 мм (2,5 периода структуры) затухание внутри запрещенной зоны составляла порядка 2 дБ. В этом случае импульс практически не искажался. В случае, когда импульс распространялся в структуре на расстояние 2 мм (5 периодов структуры) затухание составляло порядка 15 дБ. В этом случае несущая сильно подавлялась, а огибающая СВЧ импульса начинала дробиться (см. рисунок 2,б). Данное явление может быть использовано для получения импульсов пикосекундной длительности.

Для проверки адекватности работы программы был проведен эксперимент, показавший хорошее качественное и количественное совпадения с рассчитанных огибающих СВЧ импульсов и импульсами, полученными экспериментальным путем.



**Рисунок 1.** Передаточная характеристика магнонного кристалла.



**Рисунок 2.** Огибающие СВЧ импульсов, прошедших различное расстояние внутри магнонного кристалла. (а) – несущая располагается на частоте 4.01 ГГц, (б) – несущая расположена на частоте 4.08 ГГц.

#### Список литературы

1. Reed, K. W. Current status of magnetostatic reflective array filters / K. W. Reed, J. M. Owens and R. L. Carter // *Circuits Systems and Signal Process.* — 1985. — Vol. 4 — P. 157-180
2. Ustinov, A. B. Observation of spin-wave envelope solitons in periodic magnetic film structures / A. B. Ustinov, N. Yu. Grigor'eva and B. A. Kalinikos // *JETP Letters.* – 2008. – Vol. 88 — P. 31
3. Drozdovskii, A. V. Observation of self-modulation spin-wave instability in a one-dimensional magnonic crystal / A. V. Drozdovskii and B. A. Kalinikos // *JETP Letters.* – 2012. – Vol. 95 – P. 357-361
4. Vinogradova, M. V. Influence of microwave magnetic dissipation on dispersion characteristic of a magnonic crystal / M. V. Vinogradova, A. V. Drozdovskii, A. B. Ustinov, G. A. Zaretskaya // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2018. – P. 453 - 457