

## **Теоретическое исследование солитонов огибающей спиновых волн терагерцового диапазона частот в тонких гексаферритовых пленках**

*Работа посвящена изучению особенностей формирования и распространения светлых солитонов огибающей дипольно-обменных спиновых волн терагерцового диапазона частот в тонких ферритовых и гексаферритовых пленках. Исследовано влияние обменного взаимодействия и одноосной анизотропии на порог формирования солитонов.*

**Ключевые слова:** спиновые волны, ферритовые пленки

В последние годы в электронике возрастает потребность в освоении терагерцового и субтерагерцового диапазонов частот. По этой причине появляется необходимость в развитии элементной базы, позволяющей обрабатывать сигналы в названном диапазоне. Одним из материалов, который может быть положен в основу устройства, работающего на частотах 0.1-1 ТГц, является феррит с гексагональной кристаллической структурой – гексаферрит. За счёт высоких значений эффективных полей одноосной магнитной кристаллографической анизотропии гексаферриты позволяют повысить рабочие частоты СВЧ устройств до 200 ГГц и выше при относительно низких магнитных полях смещения [1].

Гексаферриты, как и ферриты, с точки зрения радиофизики относятся к нелинейным диспергирующим волноведущим средам. Солитоны огибающей – устойчивые волновые образования, распространяющиеся в упомянутых средах, – изучаются в ферромагнитных пленках [2,3], оптических волокнах [2], электромагнитных линиях передач [3], конденсате Бозе-Эйнштейна [4] и в других средах. Несмотря на то, что к настоящему моменту солитонам посвящено достаточное большое число работ, подробное исследование солитонов в гексаферритах не выполнялось.

Хорошо известно, что спиновые волны (СВ), распространяющиеся в ферритах, обусловлены диполь-дипольным и обменным взаимодействиями. При этом сравнительный вклад каждого взаимодействия различен для различных частей спектра СВ. Следует отметить одну работу Б.А. Калиникоса, посвященную изучению солитонов огибающей спиновых волн в гексаферритах [5], однако в ней основное внимание уделено солитонам огибающей СВ, имеющим такие волновые числа, при которых основной вклад в волновой процесс вносит диполь-дипольное взаимодействие. Таким образом, в гексаферритах остается неисследованной роль обменного взаимодействия на процессы формирования и распространения солитонов. Целью данной работы является теоретическое исследование влияния анизотропных свойств гексаферрита и обменного взаимодействия на терагерцовые светлые солитоны огибающей в тонких гексаферритовых пленках. Отметим также, что исследование выполнено в субтерагерцовом диапазоне частот, который является интересным с точки зрения применения в современной технике.

В работе был проведен расчет закона дисперсии СВ, распространяющихся в гексаферритовых пленках с учетом кристаллографической анизотропии. Затем рассчитывались коэффициенты нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), описывающего солитонные процессы. Наконец, был выполнен расчет порогов формирования солитонов огибающей и определено влияние анизотропии и обменного взаимодействия на пороги генерации солитонов.

Прежде чем перейти к описанию результатов, определим параметры исследуемой пленки. В ходе исследования мы считали, что пленка гексаферрита  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  М-типа (ВаМ) намагничена до насыщения, имеет намагниченность  $M_0 = 4800$  Гс и поле одноосной анизотропии  $H_a = 17000$  Э [1]. При этом её толщина равна  $L = 5.6$  мкм. Пленка помещена во внешнее магнитное поле, имеющее величину  $H_0 = 2000$  Э и лежащее в плоскости пленки. Исследовались волны, распространяющиеся вдоль поля.

Расчет дисперсионных характеристик проводился с помощью численного решения дисперсионного уравнения для дипольно-обменных спиновых волн, полученного в работе [6]. Вычисления были выполнены как для исследуемой пленки гексаферрита с учетом влияния одноосной анизотропии, так и для ферритовой пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), параметры которой были равны параметрам гексаферрита, за исключением намагниченности насыщения и анизотропии. Пленка ЖИГ имела  $M_0 = 1750$  Гс и поле кубической анизотропии, равное  $H_a = 70$  Э. Графики законов дисперсии представлены на рис. 1.

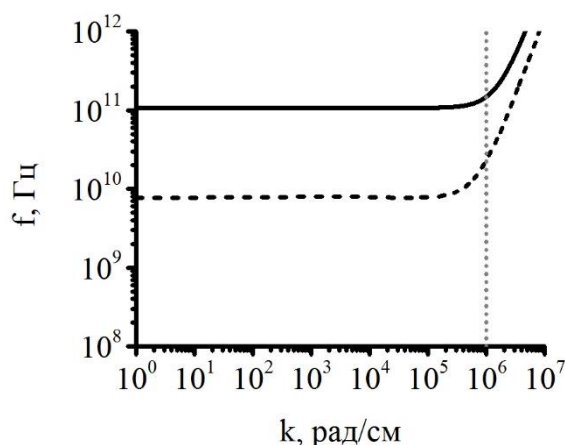


Рисунок 1. Дисперсионные характеристики СВ:  
в ВаМ – сплошная линия, в ЖИГ – штриховая линия  
(Значение волнового числа  $k = 10^6$  рад/см – серая пунктирная линия.)

Из рисунка видно, что, во-первых, одноосная анизотропия гексаферрита существенно увеличивает частоты, распространяющихся СВ, т.е. поднимает дисперсионную кривую гексаферрита относительно ЖИГ, во-вторых, обменное взаимодействие по-разному «загибает» дисперсионные кривые пленки ЖИГ и пленки ВаМ: загиб дисперсионной кривой гексаферрита начинается при больших волновых числах.

В дальнейшем мы фиксировали волновое число распространяющихся СВ ( $k_0 = 10^6$  рад/см). Данное значение волнового числа показано на рис. 1 серой пунктирной линией. При выбранном волновом числе несущая частота волн, распространяющихся в гексаферрите, лежит в субтерагерцовом диапазоне и равна 0.15 ТГц, а несущая частота волн в ЖИГ равна 23 ТГц.

Известно, что процессы распространения волн в среде с дисперсией и нелинейностью хорошо описываются с помощью НУШ с учетом затухания, которое выглядит следующим образом [3]:

$$i \left( \frac{\partial u}{\partial t} + V_g \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{D}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - N |u|^2 u = -i\Gamma u, \quad (1)$$

где  $V_g = \partial\omega/\partial k$  – групповая скорость,  $D = \partial^2\omega/\partial k^2$  – дисперсионный коэффициент,  $N = \partial\omega/\partial|u|^2$  – нелинейный коэффициент,  $\Gamma$  – декремент затухания. При выбранных параметрах коэффициенты НУШ для пленки ВаМ были равны  $V_g = 8.3 \times 10^4$  см/с,  $D = 8.3 \times 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/(рад·с),  $N = -1.4 \times 10^{11}$  рад/с, для пленки ЖИГ –  $V_g = 3 \times 10^4$  см/с,  $D = 3 \times 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/(рад·с),  $N = -1.7 \times 10^{10}$  рад/с. Декременты затухания исследуемых материалов устанавливались в соответствии с работой [1].

Поскольку солитонные процессы описываются с помощью НУШ, которое включает в себя перечисленные коэффициенты, следовательно, основываясь на значениях коэффициентов, можно делать выводы о характере процессов формирования и распространения солитонов огибающей. Хорошо известно, в области спектра СВ, в которой основной вклад в волновые процессы вносит диполь-дипольное взаимодействие ( $k < 10^4$  рад/см), дисперсионный коэффициент лежит в диапазоне 300–3000 рад/см. Таким образом, можно сделать вывод о том, что усиление роли обменного взаимодействия приводит к тому, что влияние эффекта дисперсионного расплывания на процессы распространения СВ становится незначительным.

Из сравнения значений нелинейных коэффициентов видно, что коэффициент для ВаМ на порядок больше коэффициента для ЖИГ. По причине того что с точки зрения физики СВЧ явлений эти два материала различаются в основном анизотропией, следовательно, можно говорить о том, что увеличение влияния анизотропии на волновые процессы приводит к возрастанию нелинейного коэффициента, а значит, и к более сильному проявлению эффекта фазовой самомодуляции.

Перейдем к изложению результатов расчета порога образования терагерцовых светлых солитонов огибающей СВ. Указанный порог может быть рассчитан с помощью формул, полученных в статье [7]. Результаты расчета представлены на рис. 2, из которого видно, что зависимость порога образования солитонов  $|u_{th}|^2$  от длительности входного импульса  $\tau$  имеет минимум.

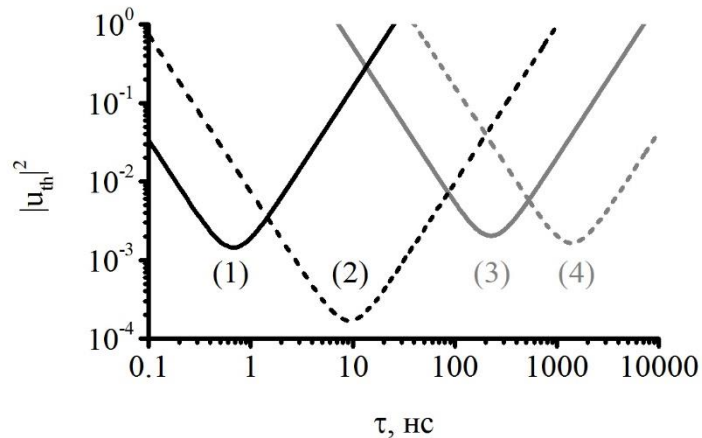


Рисунок 2. Пороги формирования солитонов СВ, распространяющихся в средах:  
 (1) – пленке ВаМ, (2) – пленке ЖИГ, (3) – пленке ВаМ без учета обменного взаимодействия, (4) – пленке ЖИГ без учета обменного взаимодействия

Из данных, представленных на рис. 2, можно сделать несколько выводов. Во-первых, высокое значение поля анизотропии гексаферрита (по сравнению с ЖИГ) приводит одновременно как к увеличению порога, так и к уменьшению длительности входного импульса, при которой наблюдается минимум порога. Во-вторых, обменное взаимодействие существенно снижает значение длительностей входных импульсов, при которых наблюдается минимум порогов формирования терагерцовых солитонов как в пленке ЖИГ, так и в пленке ВаМ.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 14-12-01296.

#### Библиографический список

1. Nicholson D.B. Hexagonal ferrites for millimeter-wave applications // *Hewlett-Packard Journal*. 1990. Vol. 41, No. 5. — P. 59-61.
2. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов к фотонным кристаллам. — М.: Физматлит, 2005. — 648 с.
3. Remoissenet M. *Waves called solitons: Concepts and Experiments*. 3rd — Berlin: Springer-Verlag, 1999. — 327 p.
4. Kevrekidis P.G., Frantzeskakis D.J., Carretero-González R. *Emergent Nonlinear Phenomena in Bose-Einstein Condensates*. — Berlin: Springer-Verlag, 2008.
5. Kalinikos B., Slavin A. Generation of short millimeter-wave radio pulses using solitons in ferrite-based active rings // *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 79, No. 10. — P. 1576-1578.
6. Беляков С.В., Калиникос Б.А., Кожусь Н.В. Дисперсия дипольно-обменных спиновых волн в анизотропных монокристаллических магнитных пленках. Часть 1. Спектр дипольно-обменных спиновых волн // *Электронная техника. Серия электроника СВЧ*. 1989. № 1(415). — С. 22-28.
7. Slavin A., Benner H. Formation and propagation of spin-wave envelope solitons in weakly dissipative ferrite waveguides // *Physical Review B*. 2003. Vol. 67, No. 17. — P. 174421.