

## **Моделирование процессов компрессии СВЧ импульсов в ферритовых пленках**

*На основе уравнения Гинзбурга-Ландау построена теория устройства сжатия СВЧ импульсов. Предложен метод, позволяющий по техническим требованиям к устройству, определить параметры активного элемента – ферритовой пленки. Результаты численного моделирования устройства показывают возможность управления величиной сжатия импульса.*

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

Одной из актуальных задач радиоэлектроники и радиотехники является разработка устройств сжатия СВЧ радиоимпульсов. Подобные устройства широко используются, например, для повышения разрешающей способности радиолокационных станций. В настоящее время существуют несколько подходов к решению этой задачи. Первый подход заключается в использовании дисперсионной линии задержки на поверхностных акустических волнах, в которой различные спектральные составляющие импульса приобретают различную задержку [1]. К недостаткам данного метода следует отнести необходимость использования частотно-модулированного сигнала и обработку сигнала с его переносом на низкие частоты.

Другой подход, предлагаемый в данной работе, заключается в использовании нелинейных устройств обработки сигнала. При использовании такого подхода конструкция радиолокационной станции может быть существенно упрощена, а обработка сигнала может осуществляться непосредственно на несущей частоте в СВЧ диапазоне. Среди всего многообразия нелинейных сред, используемых в этих устройствах, следует выделить ферритовые пленки [2]. Приборы на их основе имеют ряд преимуществ, таких как электронная управляемость, широкополосность, возможность обработки сложного СВЧ сигнала, сравнительно низкие потери и малые габариты [3]. При этом устройства на ферритовых пленках не требуют использования сложных многоэлементных конструкций микрополосковых преобразователей, необходимых в устройствах на поверхностных акустических волнах, что позволяет снять ограничения на частоту обрабатываемого сигнала.

Следует отметить, что, кроме предлагаемого устройства нелинейного сжатия СВЧ радиоимпульса, ранее был разработан ряд устройств на основе тонких ферритовых пленок (см. работы [4,5] и литературу в них). Например, сравнительно недавно были разработаны нелинейные спин-волновые фазовращатели и интерферометры [6,7]. Устройства сжатия СВЧ радиоимпульсов на основе ферритовой пленки расширят возможности обработки сигналов непосредственно на сверхвысоких частотах.

При разработке устройства необходимо отталкиваться от физических процессов, происходящих в феррите. Указанные процессы являются нелинейными процессами распространения волн в магнитной спин-системе ферритовой пленки. Подобным явлениям посвящено большое число работ. В ферритовых и ферромагнитных пленках частично изучены солитоны огибающей спиновых волн [8-12]; собственная [13] и индуцированная [14] модуляционная неустойчивость спиновых волн [15], хаос [16] и другие явления.

Обзор состояния исследований вышеперечисленных физических явлений показывает, что процесс исследования нелинейных волновых свойств ферритов далек от завершения. Так, до сих пор внимание исследователей в основном было сосредоточено на исследовании фундаментальных (одиночных) солитонов огибающей спиновых волн. Нелинейные волновые процессы, происходящие в ферритовой пленке, а также особенности формирования нелинейных волновых образований, в настоящее время изучены явно недостаточно. При этом именно процессы распространения нефундаментальных солитонов огибающей спиновых волн могут быть положены в основу устройства нелинейного сжатия СВЧ радиоимпульсов. Целью работы является теоретическое исследование нелинейных спин-волновых процессов в планарных микроструктурах, построенных на основе тонких ферритовых пленок, и разработка устройства нелинейного сжатия СВЧ радиоимпульсов.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в устройстве. СВЧ радиоимпульс, поступающий на вход устройства, возбуждает спин-волновой радиоимпульс, распространяющийся в ферритовой пленке. По мере распространения спин-волновой импульс подвергается воздействию различных линейных и нелинейных эффектов, которые могут приводить к сжатию импульса.

Хорошо известно, что процессы эволюции огибающей спиновых волн, распространяющихся в пленке, могут быть описаны с помощью уравнения Гинзбурга-Ландау [17]. Численное решение этого уравнения позволяет найти соответствие между входной и выходной формой огибающей СВЧ импульса. Запишем названное уравнение:

$$i \left( \frac{\partial u}{\partial t} + V_g \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha u \right) - \frac{D}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (N + iv_1) |u|^2 u + iv_2 |u|^4 u = 0,$$

где  $u$  - нормированная амплитуда спиновых волн, определенная как  $|u|^2 = |\mathbf{m}|^2 / 2M_0^2$ ,  $\mathbf{m}$  и  $M_0$  суть переменная намагниченность и намагниченность насыщения. В уравнении введены следующие обозначения:  $V_g = \partial \omega / \partial k$  - групповая скорость спиновых волн,  $D = \partial^2 \omega / \partial k^2$  - дисперсионный коэффициент  $N = \partial \omega / \partial |u|^2$  - нелинейный коэффициент,  $\alpha$  - декремент линейного затухания,  $v_1$  - декремент нелинейного затухания третьего порядка,  $v_2$  - декремент нелинейного затухания пятого порядка, зависимость  $\omega(k)$  является законом дисперсии. Коэффициенты уравнения зависят от параметров феррита и вычисляются исходя из дисперсионной характеристики.

В процессе работы было проведено несколько численных экспериментов для исследования эффекта нелинейного сжатия импульсов. При этом систематически варьировались параметры ферритовой пленки. В результате было установлено, что весь путь распространения спин-волнового импульса можно разделить на участок преобладания нелинейного сжатия над дисперсионным расплыванием и участок, характеризующийся преобладанием расплывания над сжатием. На первом участке благодаря действию нелинейных эффектов входной импульс приобретает нелинейную фазовую самомодуляцию. Данный процесс развивается до тех пор, пока под действием линейного и нелинейного затухания амплитуда распространяющегося спин-волнового импульса не станет ниже пороговой. В этот момент времени распространяющийся в ферритовой пленке импульс переходит в режим расплывания. Ниже представлены типичные результаты численных расчетов.

В ходе численного моделирования устанавливались следующие параметры:  $M_0 = 1890$  Гс,  $H = 2500$  Э,  $L = 5$  мкм,  $\alpha = 0.56$  МГц,  $v_1 = 1.8$  ГГц,  $v_2 = 0.3$  ТГц. Огибающая входного радиоимпульса в этом случае задавалась в форме функции гиперболического секанса:  $u_0(x, 0) = u_0 \operatorname{sech}(-2x/v_g T_0)$ . Использовались обратные

объемные спиновые волны. Квадрат амплитуды импульса устанавливался равным  $|u_0|^2 = 4.2 \cdot 10^{-3}$ , длительность –  $T_0 = 11.5$  нс. Процесс сжатия указанного импульса представлен на рисунке 1.

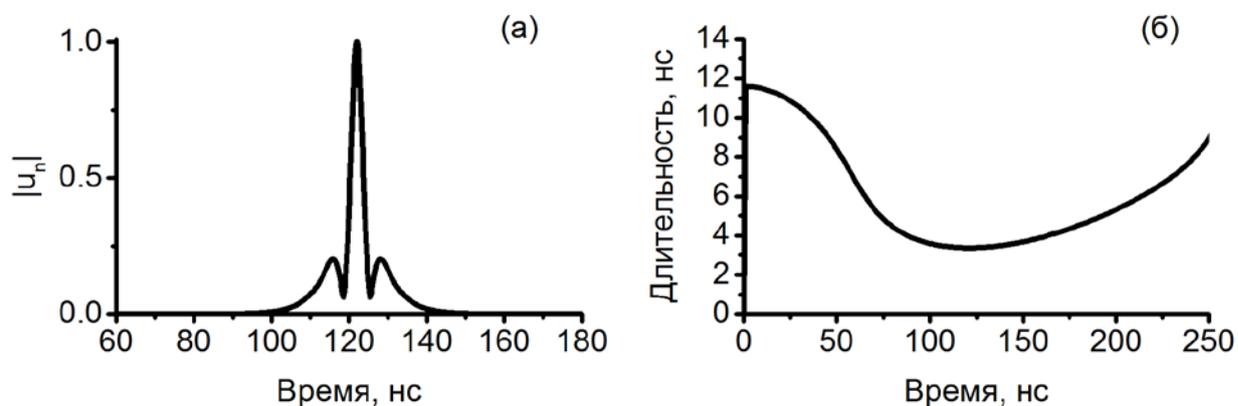


Рис. 1. Сжатие импульса длительностью 11.5 нс. На части рисунка (а) показан нормированный на амплитуду  $|u|^2 = 9.3 \cdot 10^{-3}$  профиль импульса в момент наибольшего сжатия, при  $t = 122$  нс. На части рисунка (б) изображена зависимость длительности импульса от времени распространения.

В данном численном эксперименте наблюдалось сжатие импульса при 122 нс до длительности 3.3 нс то есть в 3.4 раза. При этом наблюдалось образование солитона огибающей спиновых волн четвертого порядка. Солитон последовательно проходил состояние сжатия с образованием боковых широких импульсов, расширение с образованием двухпикового импульса. Далее солитон стремился перейти в трехпиковое состояние, однако его амплитуда в этот момент падала ниже пороговой, и импульс выходил из солитонного режима.

Следует также отметить важную особенность представленного расчета. В момент наибольшего сжатия амплитуда импульса становится больше входной амплитуды. Данная особенность обусловлена тем, что на малых длинах пробега энергия импульса не успевает рассеяться под воздействием затухания.

Кроме того, в процессе исследования были выполнены другие численные эксперименты, показавшие, что:

- 1) импульсы, которые распространяются в более тонких пленках, подвергаются большему сжатию;
- 2) использование прямых объемных вместо обратных объемных спиновых волн обеспечивает более высокую степень сжатия;
- 3) увеличение мощности входного импульса приводит к тому, что он подвергается большему сжатию на меньшем временном промежутке.

В данной работе были выполнены теоретические исследования, направленные на разработку устройства нелинейного сжатия СВЧ радиоимпульсов. Была разработана программа, позволяющая описывать эффект нелинейного сжатия, а также дающая возможность по заданным требованиям к устройству определить параметры его основного элемента, ферритовой пленки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта № 16-32-00715 мол\_а.

Библиографический список

1. Морган Д. Устройства обработки сигналов 1990. — 416 с.
2. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. — М.: Физматлит, 1994. — 464 с.
3. Adam J.D., Davis L.E., Dionne G.F., Schloemann E.F., Stitzer S.N. Ferrite Devices and Materials // IEEE Transactions on Magnetics Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, No. 3. — P. 721-737.
4. Ishak W.S. Magnetostatic wave technology: A review // Proceedings of the IEEE. 1988. Vol. 76, No. 2. — P. 171-187.
5. Adam J., Krishnaswamy S., Talisa S., Yoo K. Thin-film ferrites for microwave and millimeter-wave applications // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1990. Vol. 83, No. 1. — P. 419-424.
6. Ustinova A.B., Kalinikos B.A. Ferrite-film nonlinear spin wave interferometer and its application for power-selective suppression of pulsed microwave signals // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 90, — P. 252510.
7. Ustinov A.B., Srinivasana G., Kalinikos B.A. Ferrite-ferroelectric hybrid wave phase shifters // Applied Physics Letters. 2007. Vol. 90, — P. 031913.
8. Фетисов Ю.К., Паттон С.Е., Сыногач В.Т. Солитоны огибающей в среде с сильным нелинейным затуханием // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2006. Т. 83, № 11. — С. 579-584.
9. Калиникос Б., Ковшиков Н. Наблюдение столкновения солитонов огибающей спиновых волн в ферромагнитных пленках // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 60, № 4. — С. 290-293.
10. Wu M., Kalinikos B.A., Carr L.D., Patton C.E. Observation of Spin-Wave Soliton Fractals in Magnetic Film Active Feedback Rings // Physical Review Letters. 2006. Vol. 96, — P. 187202.
11. Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П. Генерация стационарной последовательности хаотических солитоноподобных СВЧ импульсов в кольцевых автоколебательных системах с ферромагнитными пленками // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2008. Т. 88, № 10. — С. 743-747.
12. Ustinov A.B., Demidov V.E., Kondrashov A.V., Kalinikos B.A., Demokritov S.O. Observation of the Chaotic Spin-Wave Soliton Trains in Magnetic Films // Physical Review Letters. 2011. Vol. 106, No. 1. — P. 017201.
13. Калиникос Б.А., Ковшиков Н.Г., Славин А.Н. Спин-волновые солитоны в ферромагнитных пленках: наблюдение модуляционной неустойчивости спиновых волн при непрерывном возбуждении // Письма в Журнал технической физики. 1984. Т. 10, № 15. — С. 936-940.
14. Boyle J.W., Nikitov S.A., Boardman A.D., Xie K. Observation of cross-phase induced modulation instability of travelling magnetostatic waves in ferromagnetic films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1997. Vol. 173, — P. 241-252.
15. Wu M., Kalinikos B.A. Coupled modulational instability of copropagating spin waves in magnetic thin films // Physical Review Letters. 2008. Vol. 101, — P. 027206.
16. Grishin S.V., Sharaevskii Y.P., Nikitov S.A., Romanenko D.V. Generation of Chaotic Microwave Pulses in Ferromagnetic Film Ring Oscillators Under External Influence // IEEE Transactions on Magnetics. 2013. Vol. 49, No. 3. — P. 1047-1054.
17. Scott M.M., Kostylev M.P., Kalinikos B.A., Patton C.E. Nonlinear damping of high-power magnetostatic waves in yttrium-iron-garnet films // Journal of Applied Physics. 2004. Vol. 95, No. 11. — P. 6294.