

05; 09

© 1990

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОИМПУЛЬСА  
МАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ  
В ФЕРРИТОВОМ ВОЛНОВОДЕД.А. Барышев, А.В. Васьковский,  
К.В. Гречушкин, А.В. Стальмахов

Одним из наиболее перспективных направлений использования магнитостатических волн (МСВ) в технике СВЧ является создание на их основе перестраиваемых линий задержки [1, 2]. Ранее теоретически исследовалось прохождение радиоимпульсов через магнитостатическую линию задержки без учета ширины волноведущей структуры [3]. Однако в большинстве разрабатываемых устройств на основе МСВ используются ограниченные по ширине ферритовые пленки (ферритовые волноводы), поэтому исследование физических аспектов прохождения радиоимпульсов МСВ через ферритовый волновод представляет большой теоретический и практический интерес.

В настоящей работе впервые рассмотрена задача о распространении импульса поверхностной МСВ в ферритовом волноводе с учетом многомодового характера волноводного распространения поверхностной волны [4] для произвольной апертуры входного и выходного преобразователей МСВ. Исследуемая структура и система координат изображены на рис. 1. Теоретически задача решалась в безобменном магнитостатическом приближении с учетом потерь в ферритовой пленке. Будем считать, что МСВ возбуждается только под излучающим преобразователем с постоянной вдоль него  $y$ -составляющей в.ч. магнитной индукции  $-by$ . Это предположение справедливо для случая, когда длина электромагнитной волны значительно больше длины микрополоскового преобразователя  $2S$ , что практически всегда выполняется при возбуждении МСВ. Далее будем считать, что на боковых границах ферритового волновода выполняется граничное условие типа „магнитная стенка” [5], т.е. магнитостатический потенциал  $\psi = 0$ , и предположим, что преобразователи МСВ согласованы с ферритовым волноводом во всем частотном диапазоне существования поверхностной МСВ.

Пусть на входной преобразователь МСВ поступает последовательность симметричных трапецеидальных импульсов с периодом следования  $T$ . В рамках используемых приближений можно считать, что под входным преобразователем МСВ амплитуда  $y$ -составляющей в.ч. магнитной индукции изменяется во времени так же, как и входной СВЧ сигнал. Тогда, представляя временную зависимость  $b_y$  при  $y = 0$  в виде ряда Фурье и учитывая, что поверхностные МСВ существуют в ограниченном частотном диапазоне, опреде-

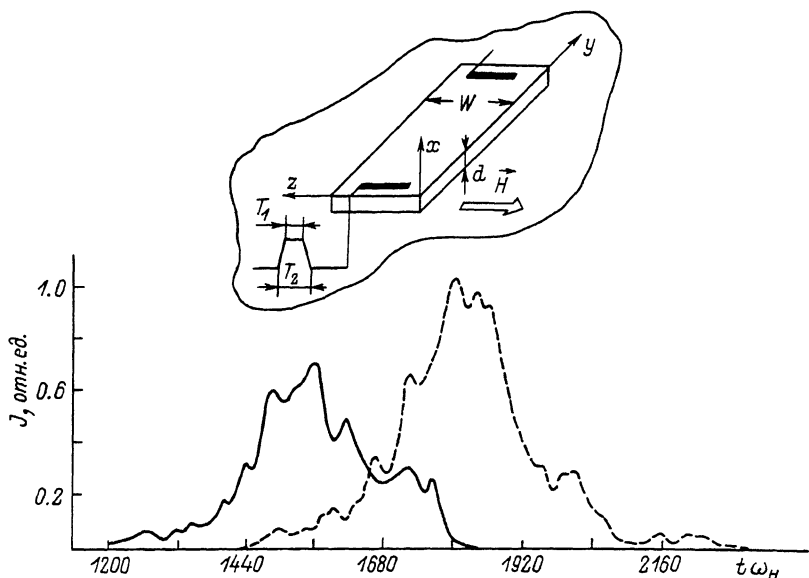


Рис. 1. Огибающая выходного сигнала. Сплошная линия — для ферритового волновода с шириной  $W = 50d$ , штриховая линия — для безграничной ферритовой пленки. Расчеты выполнены для  $\frac{M_0}{H} = 2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{W}{2}$ ,  $s_1 = s_2 = \frac{W}{2}$ ,  $y = 1000d$ ,  $\Gamma = 1200 \omega_H^{-1}$ ,  $T_1 = T_2 = 300 \omega_H^{-1}$ ,  $\omega_0 = 1.74 \omega_H$ ,  $\omega_H = \gamma H$ ,  $\gamma = 2.8 \frac{\text{МГц}}{\text{Э}}$ . На вставке показана геометрия задачи.

ляемым внешним постоянным магнитным полем, получаем

$$b_y(0, z, t) = f(z) \sum_{n=-n_1}^{n_2} \frac{2AT}{(n\pi)^2(T_1 - T_2)} \times \quad (1)$$

$$\times \sin[N(T_1 - T_2)] \sin[N(T_1 + T_2)] e^{jn\omega't},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — временные параметры импульса (см. рис. 1),  $\omega' = \frac{2\pi}{T}$ ,  $N = \frac{n\pi}{2T}$ ,  $A$  — амплитуда импульса, которую в дальнейшем, не нарушая общности, будем считать равной единице. В формуле (1)  $f(z)$  является апертурной функцией, которую для простоты без учета краевых эффектов будем представлять в виде

$$f(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } \alpha_1 - S_1 \leq z \leq \alpha_1 + S_1 \\ 0 & \text{при } z > \alpha_1 + S_1 \text{ и } z < \alpha_1 - S_1, \end{cases}$$

где  $\alpha_1$  — значение координаты  $z$  центра входного преобразователя с апертурой  $2S_1$ . Пределы суммирования  $n_1$  и  $n_2$  для поверхностной МСВ вычисляются по формулам, которые можно получить, исходя из граничных частот поверхностной волны

$$n_1 = \left[ \frac{\omega_0 - \gamma \sqrt{H(H + 4\pi M_0)}}{2\pi} T \right], \quad n_2 = \left[ \frac{\gamma(H + 2\pi M_0) - \omega_0}{2\pi} T \right],$$

где  $H$  — постоянное магнитное поле,  $M_0$  — намагниченность насыщения феррита,  $\gamma$  — гиромангнитное отношение,  $\omega_0$  — частота заполнения радиоимпульса.

Используя выражения, приведенные в работе [4], для  $b_y$  можно получить

$$b_y(y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{m\pi} \sin(\alpha_1 M) \sin(S_1 M) \sin(Mz) e^{-jk_m(\omega)y}, \quad (2)$$

где  $M = \frac{m\pi}{W}$ ,  $K_m(\omega)$  — постоянная распространения  $m$ -моды, которая находится из решения дисперсионного уравнения поверхностной МСВ. Это выражение позволяет получить значение  $b_y$  поверхностной МСВ в любой точке ферритового волновода в случае монохроматического сигнала с частотой  $\omega$ . Применяя выражение (2) к каждой временной гармонике в формуле (1) и суммируя полученные результаты, для  $b_y(y, z, t)$  в любой точке ферритового волновода имеем:

$$b_y(y, z, t) = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8T}{m^2 n^2 \pi^3 (T_1 - T_2)} \sin[N(T_1 - T_2)] \times \quad (3)$$

$$\times \sin[N(T_1 + T_2)] \sin(\alpha_1 M) \sin(S_1 M) \sin(Mz) e^{j(n\omega t - K_{nm}y)}.$$

В используемых приближениях интеграл от  $b_y(y, z, t)$ , взятый вдоль выходного преобразователя, будет пропорционален выходному сигналу в линии передачи на МСВ. Проинтегрировав выражение (3), получаем

$$I(y, t) = \sum_{n=-n_1}^{n_2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{16TW}{m^2 n^2 \pi^4 (T_1 - T_2) d} \sin[N(T_1 - T_2)] \sin[N(T_1 + T_2)] \times \quad (4)$$

$$\times \sin(\alpha_1 M) \sin(S_1 M) \sin(\alpha_2 M) \sin(S_2 M) e^{j(n\omega t - K_{nm}y)},$$

где  $\alpha_2$  — значение координаты  $z$  центра выходного преобразователя с апертурой  $2S_2$ . Используя выражение (4), можно рассчитать форму огибающей импульса в ферритовом волноводе для произвольного расстояния между преобразователями и определить время задержки импульса.

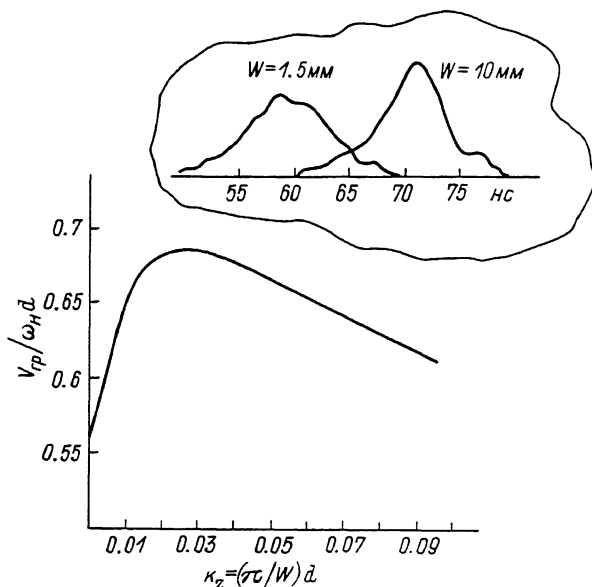


Рис. 2. Зависимость групповой скорости поверхностной МСВ от поперечного волнового числа в ферритовом волноводе. Расчет выполнен для  $\frac{M_0}{H} = 2$ ,  $\omega = 1.74 \omega_H$ . На вставке показаны результаты эксперимента, выполненного при следующих значениях параметров:  $y = 4$  мм,  $H = 740$  Э,  $4\pi M_0 = 1750$  Гс,  $\frac{\omega_0}{2\pi} = 3850$  МГц,  $d = 6$  мкм,  $T_1 = T_2 = 15$  нс,  $T = 100$  нс,  $s_1 = s_2 = \frac{W}{2}$ .

На рис. 1 показаны результаты расчетов зависимости относительной интенсивности  $J$  выходного СВЧ сигнала от нормированного времени в линии передачи на основе ферритового волновода (сплошная кривая) и для безграничной ферритовой пленки (штриховая кривая) для случая возбуждения поверхностной МСВ радиоимпульсом с прямоугольной огибающей. Из рисунка видно, что учет ограниченности ферритовой пленки мало влияет на форму огибающей импульса, но существенно влияет на время его задержки, которое уменьшается и зависит от ширины ферритового волновода. Зависимость времени задержки от ширины ферритового волновода можно объяснить, исходя из следующих соображений. Из формулы (4) видно, что амплитуды пространственных и временных гармоник спадают обратно пропорционально квадрату их номера; т.к. для поверхностной МСВ в ферритовом волноводе нулевая мода отсутствует, время задержки импульса в основном определяется групповой скоростью  $V_{гр}$  первой моды ( $m=1$ ) нулевой временной гармоники импульса.

Из рис. 2, на котором показана зависимость групповой скорости нулевой гармоники импульса поверхностной МСВ от поперечного волнового числа  $\kappa_z = \frac{\pi}{W}$ , видно, что с уменьшением  $W$  значение

групповой скорости возрастает, что приводит к уменьшению задержки импульса. Хотя с дальнейшим уменьшением  $W$  величина групповой скорости и начинает уменьшаться, однако это происходит при таких значениях ширины ферритового волновода, которые не используются в практических разработках из-за трудностей согласования волновода с входным и выходным преобразователями. Для проверки теоретических выводов об уменьшении времени задержки импульса поверхностной МСВ при учете ширины ферритового волновода были проведены эксперименты по измерению времени задержки импульса в ферритовых волноводах различной ширины, выполненных из пленки железиттриевого граната. Результаты эксперимента, которые представлены на вставке к рис. 2, хорошо согласуются с теоретическими оценками, выполненными для параметров эксперимента с помощью формулы (4). Видно, что в ферритовом волноводе с шириной  $W = 1.5$  мм и длиной 4 мм задержка уменьшилась на 10 нс по сравнению с задержкой импульса в волноводе шириной  $W = 10$  мм.

Обнаруженное уменьшение времени задержки радиоимпульса поверхностной МСВ с уменьшением ширины ферритового волновода необходимо учитывать при практических разработках устройств на основе МСВ.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] C a s t e r a J.P. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. N 6. P. 2506-2511.
- [2] S e t h a r e s J.C. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. N 3. P. 2646-2651.
- [3] К у д и н о в Е.В., Ш а б у н и н А.П. Радиотехнические устройства, Киев: Укр. НИИНТИ, 1987. С. 4-13.
- [4] Г р е ч у ш к и н К.В., С т а л ь м а х о в А.В., Т ю л ю к и н В.А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 21. С. 1973-1978.
- [5] O' K e e f e T.W., P a t t e r s o n R.W. // J. Appl. Phys. 1976. V. 49. N 9. P. 4886-4895.

Поступило в Редакцию  
19 октября 1989 г.