

05

Широкополосные спин-волновые линии задержки со щелевыми антеннами

© Ю.Л. Етко, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) „ЛЭТИ“
E-mail: ustinov-rus@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2011 г.

Исследована планарная спин-волновая линия задержки со щелевыми антеннами, изготовленная на основе пленки железо-иттриевого граната. Особенностью разработанной конструкции является сравнительно широкая полоса пропускания СВЧ-сигнала величиной около 1.8 GHz. В пределах полосы время задержки плавно изменяется от 4 до 18 ns. Центральная частота может перестраиваться внешним магнитным полем в пределах 5–9 GHz. Показано, что использование щелевых антенн и сравнительно толстых ферромагнитных пленок позволяет существенно расширить полосу пропускания СВЧ-сигнала спин-волновых приборов.

Спиновые волны (СВ), распространяющиеся в ферромагнитных пленках (ФП), имеют широкие возможности применения для обработки и генерации СВЧ-сигналов. Разнообразие дисперсионных характеристик СВ, а также различные способы изменения их вида позволили создать линии задержки различных типов [1,2]. Так, дисперсионные линии задержки с линейной зависимостью времени задержки от частоты были созданы либо с использованием плоского металлического экрана, располагавшегося вблизи пленки параллельно ее поверхности [3], либо с использованием экрана, расстояние от которого до ферромагнитной пленки менялось по определенному закону [4]. Бездисперсионные линии задержки можно создавать на основе пленок, экранированных с обеих сторон, а также путем каскадного соединения двух дисперсионных линий задержки с одинаковыми по величине и противоположными по знаку наклонами зависимостей времени задержки от частоты [5,6]. Основными достоинствами последних являются возможность электрического управления временем задержки в широких пределах (время задержки можно менять в 2 раза), а также их миниатюрность.

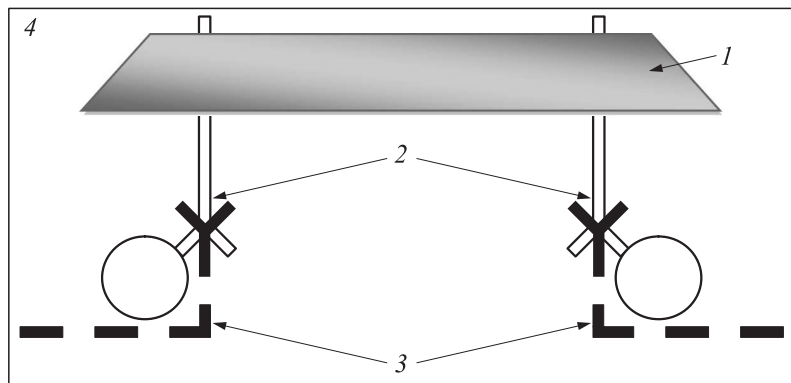


Рис. 1. Схематическое изображение линии задержки.

Для возбуждения и приема СВ можно использовать антенны в виде отрезков микрополосковых линий [7], щелевых линий и копланарных волноводов [8]. Несмотря на большое многообразие уже разработанных конструкций спин-волновых линий задержки, в них обычно использовались микрополосные антенны. Вместе с тем применение щелевых антенн могло бы дать ряд преимуществ. Как видно из рис. 1, при использовании щелевых антенн поверхность ФП оказывается металлизированной. Спиновые волны, распространяющиеся в металлизированных пленках, обладают более высокой групповой скоростью по сравнению с волнами в неэкранированных ФП [9]. Поэтому использование щелевых антенн может привести к существенному увеличению частотной полосы возбуждения спиновых волн. Также следует отметить, что вследствие изменения закона дисперсии изменяются нелинейные характеристики СВ, например расширяются возможности формирования солитонов огибающей СВ [10]. Кроме того, интерес к щелевым линиям в последние годы стимулируется возможностью их использования для создания феррит-сегнетоэлектрических устройств с двойным электронным управлением [11].

Целью данной работы являлось исследование характеристик спин-волновой линии задержки со щелевыми антеннами, а также изучение возможностей расширения частотной полосы спин-волновых устройств при использовании разработанной конструкции.

Металлические экраны влияют на дисперсию спиновых волн через дипольное магнитное поле, выходящее за пределы пленки. В случае поверхностных СВ распределение магнитостатического потенциала по толщине пленки описывается гиперболическими функциями и его максимум находится на поверхности пленки. Таким образом, для поверхностных СВ явление выхода дипольного магнитного поля за пределы пленки выражено наиболее сильно и их дисперсионные характеристики изменяются значительно, чем у других типов волн. Поэтому в разработанной линии задержки в качестве „рабочих“ были выбраны поверхностные волны.

Топология линии задержки схематически показана на рис. 1. Она была изготовлена на основе пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной $L = 65 \mu\text{m}$ (1), эпитаксиально выращенной на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной $500 \mu\text{m}$. Длина пленочного волновода составляла 4 см, ширина 2 мм. Намагниченность насыщения M пленки составляла 1750 Gs. Для возбуждения и приема СВ использовались щелевые антенны (2) шириной $50 \mu\text{m}$ и длиной 8 мм. Расстояние между антеннами d составляло 10 мм. Подвод СВЧ-мощности к антеннам, а также ее отвод осуществлялись микрополосковыми линиями (3) с волновым сопротивлением 50Ω . Для получения хорошей электродинамической связи между микрополосковой линией и щелевой антенной была разработана оригинальная конструкция микрополосково-щелевого перехода. Щелевые антенны были сформированы на верхней стороне поликоровой подложки (4), а подводящие микрополосковые линии — на нижней. Пленка ЖИГ накладывалась непосредственно на щелевые антенны. При этом ее поверхность оказывалась соприкасающейся с металлом. Макет линии задержки помещался между полюсами электромагнита в однородное магнитное поле H , направленное в плоскости пленки параллельно антеннам и перпендикулярно направлению распространения СВ таким образом, чтобы выполнялись условия для распространения поверхностных спиновых волн.

При проведении экспериментальных исследований были измерены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) линии задержки в диапазоне полей H от 900 до 2200 Oe. Типичные АЧХ показаны на рис. 2, а. Из графиков видно, что в исследуемом диапазоне магнитных полей центральная частота полосы пропускания линии задержки изменяется от 5 до 9 GHz, а вносимые потери варьируются в диапазоне 10–20 dB. Ширина полосы

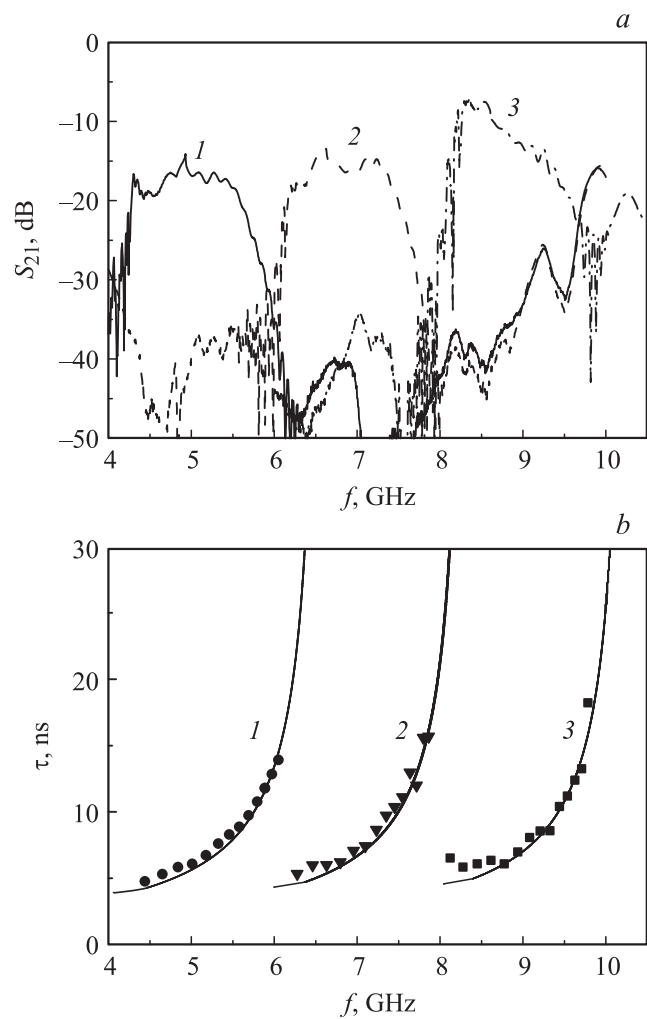


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики (а) и зависимости времени задержки от частоты (б) при различных значениях магнитного поля H : 1 — 900 Oe, 2 — 1500 Oe, 3 — 2200 Oe.

пропускания, измеренная по уровню -20 dB от минимальных вносимых потерь, составляет около 1.8 GHz. На рис. 2, *b* символами показаны экспериментальные зависимости времени задержки τ от частоты f , которые были определены по измеренным ФЧХ. Результаты показывают, что в пределах полосы пропускания τ плавно изменяется от 4 до 18 ns.

Линиями на рис. 2, *b* показаны теоретические зависимости $\tau(f)$, рассчитанные по формуле:

$$\tau(f) = \frac{d}{v_g(f)}, \quad (1)$$

где $v_g(f)$ — частотная зависимость групповой скорости СВ, определенная на основе закона дисперсии $\omega(k)$. Детальный анализ экспериментальных результатов показал, что закон дисперсии в исследованной конструкции хорошо описывается формулой для структуры феррит–диэлектрик–металл [9]:

$$e^{-2kL} = \left(1 + 2 \frac{\omega_H}{\omega_M} + 2s \frac{\omega}{\omega_M} \right) \frac{\omega_H + (\omega_M - s\omega)(1 + \tanh(kt))}{\omega_H + (\omega_M + s\omega)(1 - \tanh(kt))}, \quad (2)$$

в которой расстояние t между ферритом и металлом взято равным $5 \mu\text{m}$. Такое значение является типичным для случая механического контакта пленки с металлизированной подложкой. В формуле (2) использованы следующие обозначения: $\omega_H = 2\pi|\gamma|H$, $\omega_M = 2\pi|\gamma|M$, $|\gamma|$ — гиромагнитное отношение, равное 2.8 MHz/Oe, ω — циклическая частота спиновой волны, а k — ее волновое число. При этом s -параметр принимает значения ± 1 в зависимости от направления распространения волны.

Одной из отличительных особенностей разработанной конструкции линии задержки является сравнительно широкая полоса пропускания СВЧ-сигнала. Она определяется частотным диапазоном возбуждения СВ, который можно вычислить как

$$\Delta f = f|_{k=k_{\max}} - f|_{k=0}, \quad (3)$$

где k_{\max} — максимальное значение волнового числа возбуждающейся волны. Диапазон возбуждения в свою очередь определяется шириной области локализации СВЧ-тока в антенне спиновых волн. Ясно, что в случае возбуждения СВ микрополосковой антенной СВЧ-ток

локализован в пределах микрополоска. Поэтому максимальное значение волнового числа определяется хорошо известным соотношением $k_{\max} = 4.8/w$, где w — ширина микрополосковой антенны [7]. В случае же использования щелевой антенны СВЧ-ток растекается в металлических плоскостях вблизи щели. Поэтому у щелевой антенны той же ширины, что и микрополосковая антенна, область локализации тока оказывается шире, а k_{\max} — меньше.

Значение k_{\max} для щелевой линии было определено из проведенных экспериментов следующим образом. Верхнюю граничную частоту возбуждения СВ определяли по высокочастотному склону АЧХ как частоту, на которой уровень полезного сигнала становится равным уровню шума. Затем по закону дисперсии (2) определяли значение волнового числа. Результаты показали, что для исследуемой конструкции k_{\max} составляло около 100 rad/cm , т.е. имело значение на порядок меньше, чем для микрополосковой антенны. Тем не менее даже при таком сравнительно малом k_{\max} было получено расширение частотной полосы возбуждения СВ. Действительно, в исследуемой линии задержки она в несколько раз превышает область существования СВ в свободной пленке [7]. Заметим, что это получилось благодаря использованию в линии задержки сравнительно толстой пленки (напомним, что $L = 65 \mu\text{m}$). Ясно, что уменьшение L будет приводить к сужению полосы возбуждения спиновых волн щелевой линией сильнее, чем микрополосковой, из-за разницы в значениях k_{\max} . Расчеты приводят к выводу, что существует некоторое значение толщины пленки L_{cr} , при достижении которого использование щелевой антенны для построения широкополосных приборов оказывается нецелесообразным.

На рис. 3 сплошной линией показана зависимость L_{cr} от H . Значения L_{cr} были определены из условия равенства полос возбуждения спиновых волн микрополосковой и щелевой антеннами при соответствующих k_{\max} . Подчеркнем важность полученной зависимости. Она состоит в том, что полосу возбуждения спиновых волн можно увеличить при использовании щелевых антенн в том случае, если толщина ферромагнитной пленки больше, чем L_{cr} . Чтобы продемонстрировать частотную перестройку линии задержки, на том же рисунке пунктирной линией показана зависимость нижней граничной частоты возбуждения поверхностных спиновых волн от H .

Из проведенного исследования следует, что использование щелевых антенн и сравнительно толстых ферромагнитных пленок позволяет су-

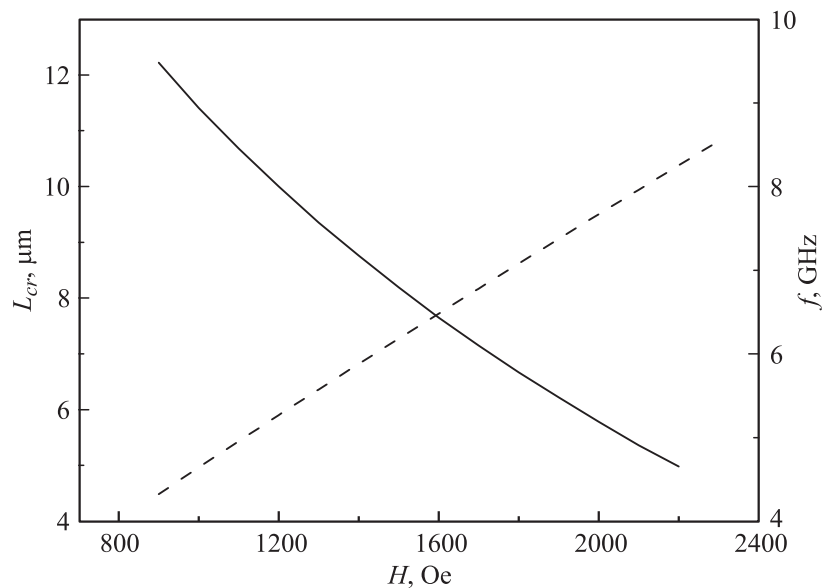


Рис. 3. Критическое значение толщины пленки ЖИГ (сплошная линия) и нижняя граничная частота возбуждения поверхностных спиновых волн (пунктирная линия) как функции магнитного поля.

щественно расширить полосу пропускания СВЧ-сигнала спин-волновых приборов в виде линии задержки. При оценке широкополосности таких приборов следует учитывать такие особенности, как растекание тока в щелевых антеннах. Рассмотренная линия задержки может найти различные применения как перестраиваемый элемент широкополосных телекоммуникационных устройств.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ, Министерства образования и науки РФ и гранта президента РФ.

Список литературы

- [1] Adam J.D. // IEEE. 1988. V. 76. N 12. P. 156–170.
- [2] Ishak W.S. // IEEE. 1988. V. 76. N 12. P. 171–187.

- [3] *Adam J.D., Daniel M.R.* // Microwave Journal. 1982. V. 25. N 2. P. 95–99.
- [4] *Chang K.W., Owens J.M., Carter R.L.* // Electronics Letters. 1983. V. 19. P. 546–547.
- [5] *Ustinov A.B., Demidov V.E., Kalinicos B.A.* // Electronics Letters. 2001. V. 37. N 19. P. 1161–1162.
- [6] *Высоцкий С.Л., Казаков Г.Т., Кожевников А.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 36. В. 15. С. 45–50.
- [7] *Дмитрина В.Ф., Калинин Б.А.* // Изв. вузов. Физика. 1988. Т. 31. В. 11. С. 24–53.
- [8] *Дмитриев В.Ф.* // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 36. № 9. С. 1821–1828.
- [9] *Vongianni W.L.* // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 2541–2544.
- [10] *Устинов А.Б., Гигорьева Н.Ю., Калинин Б.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. В. 1. С. 34–39.
- [11] *Белявский П.Ю., Никитин А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А.* // ФТТ. 2009. Т. 51. В. 7. С. 1446–1447.