

Слоистый феррит-сегнетоэлектрический резонатор с электрическим и магнитным управлением

© П.Ю. Белявский, А.А. Никитин, С.Ф. Карманенко, А.А. Семенов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)

Санкт-Петербург, Россия

E-mail: semalexander@gmail.com

Рассмотрен принцип построения устройств с двойным электрическим и магнитным управлением на основе связанных ферромагнитной резонаторной структуры и щелевой линии, содержащей сегнетоэлектрическую пленку. Показана эффективная гибридизация поверхностной магнитостатической волны и щелевой моды.

PACS: 41.20.Jb, 85.70.Ge, 85.70.Kh, 84.40.Az

Прогресс в разработке и создании различных радиоэлектронных систем, например, сотовой и спутниковой мобильной связи, компьютерных сетей навигации, управления подвижными объектами и др., в значительной мере обусловлен созданием новых микроэлектронных компонент и приборов. Одним из путей создания таких приборов является использование волн различной природы, распространяющихся в слоистых структурах. Так, например, спиновые волны, распространяющиеся в ферромагнитных пленках и слоистых структурах на их основе уже многие годы успешно используются для построения разнообразных приборов обработки сигналов в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) [1,2]. Благодаря таким свойствам, как малая фазовая и групповая скорости, богатство дисперсионных характеристик, легкость возбуждения и приема, малые потери на распространение, спиновые волны нашли применение в целом ряде линейных и нелинейных приборов.

Одним из основных преимуществ спин-волновых приборов, использующих ферритовые материалы, является возможность их широкой немеханической перестройки. Эта перестройка реализуется за счет изменения поля подмагничивания, поэтому она может быть названа магнитной перестройкой. Магнитная перестройка легко реализуется в широком интервале частот, но является сравнительно медленной и энергоемкой.

Другими материалами, которые могут быть использованы для построения электронно-перестраиваемых СВЧ-приборов, являются сегнетоэлектрики. При использовании сегнетоэлектриков перестройка реализуется за счет изменения прикладываемого электрического поля. Поэтому такая перестройка может быть названа электрической перестройкой. Понятно, что комбинация ферритовых и сегнетоэлектрических материалов должна обеспечить одновременную магнитную и электрическую перестройку.

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования были сделаны для слоистой структуры феррит-сегнетоэлектрик, в которой в качестве сегнетоэлектрика использовалась керамика титаната бария-стронция (BSTO) [3,4]. Была продемонстрирована возможность двойного управления и наличие эффективной перестройки резонансной частоты резонатора на основе

исследованной структуры от внешнего электрического поля. Основные недостатки устройств, использующих такую слоистую структуру, были связаны с наличием керамического слоя толщиной до $500 \mu\text{m}$. К недостаткам следует отнести также высокие управляющие напряжения $500\text{--}1000 \text{ V}$ и достаточно большие времена переключения до $10 \mu\text{s}$. С другой стороны, использование толстого керамического образца BSTO необходимо для обеспечения более эффективной гибридизации магнитостатической волны (MSW), связанной с ферромагнитной пленкой, и ТЕ-волны открытого диэлектрического (керамического) волновода.

Одним из возможных путей решения данных проблем является использование волноведущей структуры на основе щелевой линии вместо открытого диэлектрического волновода. Щелевые и копланарные линии передачи, образованные системой электродов, нанесенных на поверхность сегнетоэлектрической пленки (СЭП), могут рассматриваться как волноведущие структуры преимущественно в коротковолновой части сантиметрового диапазона и миллиметрового диапазона длин волн. Использование СЭП, нанесенной на диэлектрическую подложку, придает дополнительное качество таким линиям передачи. Это связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, аномально большая диэлектрическая проницаемость СЭП ($\epsilon \sim 10^3$) приводит к эффективной концентрации электромагнитного поля в направляющих щелях. Тем самым достигается большее замедление электромагнитной волны. Во-вторых, появляется возможность управления постоянной распространения путем приложения разности потенциалов к электродам щелевой линии.

На рис. 1 представлены дисперсионные зависимости электромагнитной волны в щелевой линии и дисперсионная зависимость поверхностной MSW. В точках пересечения наблюдается фазовый синхронизм, что предполагает эффективную гибридизацию рассматриваемых волн. Конструктивные параметры щелевой линии таковы: толщина подложки 0.5 mm , ее диэлектрическая проницаемость равна 10, ширина щели $150 \mu\text{m}$, толщина СЭП $10 \mu\text{m}$. Параметры ферромагнитного образца составляют: толщина пленки железо-иттриевого граната

(YIG) $6\ \mu\text{m}$, намагниченность насыщения $M_0 = 1750\ \text{Oe}$, напряженность магнитного поля $H = 1570\ \text{Oe}$.

Анализ рис. 1 приводит к двум важным выводам. Тонкая СЭП под электродами щелевой линии эффективно канализирует электромагнитную волну благодаря высокой диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \sim 10^3$). Замедление волны в линии оценивается отношением k/k_0 , где k_0 — постоянная распространения в свободном пространстве. Исходя из полученных результатов, можно ожидать достаточно эффективную гибридную волну щелевой линии и магнитоэлектрической волны ферромагнитного резонатора.

Расчеты, выполненные по дисперсионному уравнению [3], показали, что наибольшая электрическая управляемость (при приложении электрического поля к сегнетоэлектрическому слою) достигается в зоне гибридной („расталкивания“) кривых, отвечающих чисто электромагнитным и спиновым волнам.

Для экспериментального исследования поверхностных электромагнитно-спиновых волн использовалось устройство, изображенное на рис. 2. Экспериментальный макет состоял из щелевой линии передачи, сформированной на слоистой структуре СЭП–диэлектрическая подложка с шириной щели $150\ \mu\text{m}$ и длиной $20\ \text{mm}$. Пленка YIG толщиной $6\ \mu\text{m}$, шириной $0.5\ \text{mm}$, длиной $2.5\ \text{mm}$, выращенная на подложке из гадолиний-

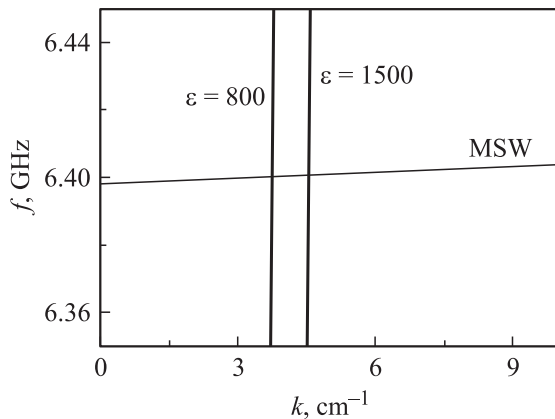


Рис. 1. Дисперсионные характеристики электромагнитной волны щелевой линии для разных ε и поверхностной магнитоэлектрической волны.

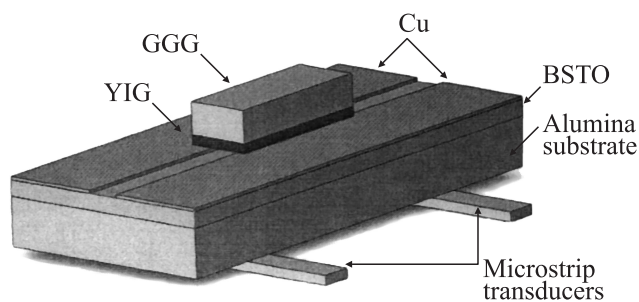


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментального макета.

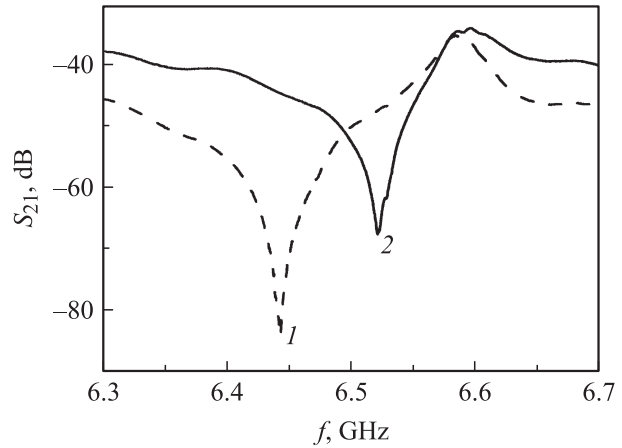


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики феррит-сегнетоэлектрического резонатора, измеренные при напряжениях смещения 0 (1) и $5\ \text{V}/\mu\text{m}$ (2).

галлиевого граната (GGG) толщиной $500\ \mu\text{m}$, размещалась поверх щелевой линии в зазоре электродов. Electroды щелевой линии одновременно являлись и волноведущей структурой и электродами для подачи постоянного управляющего потенциала. Сегнетоэлектрическая пленка $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ была выращена методом ВЧ-ионно-плазменного распыления. Сформированный таким образом резонатор помещался в касательное магнитное поле.

На рис. 3 приведены экспериментальные частотные характеристики такого феррит-сегнетоэлектрического резонатора, измеренные при различных напряжениях смещения.

Кривая 1 соответствует нулевой напряженности управляющего поля, кривая 2 — $5\ \text{V}/\mu\text{m}$. Электрическая перестройка, полученная в эксперименте, составила $77\ \text{MHz}$, что соответствует трем полосам пропускания резонатора. При этом данная конструкция избавлена от целого ряда недостатков резонатора с двойным управлением, содержащих сегнетокерамические слои. Так как данная конструкция резонатора лишена керамических слоев, возможно ее интегральное исполнение.

Список литературы

- [1] Ю.М. Яковлев, С.Ш. Генделев. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. Сов. радио. М. (1975). 360 с.
- [2] W.S. Ishak. Proc. IEEE **76**, 2, 171 (1988).
- [3] В.Е. Демидов, Б.А. Калиникос, С.Ф. Карманенко, А.А. Семенов, П. Эденхофер. Письма в ЖТФ **28**, 11, 75 (2002).
- [4] V.E. Demidov, B.A. Kalinikos, S.F. Karmanenko, A.A. Semenov, P. Edenhofer. IEEE Trans. Microwave Theory Techn. **51**, 10, 2090 (2003).