

Объемные ферритовые преобразователи СВЧ импульсных сигналов¹

ШАКИРЗЯНОВ Ф.Н., НИКИФОРОВ А.В.

Рассмотрены стабильные и нестабильные нелинейные эффекты при ферромагнитном резонансе в ферритах на сверхвысоких частотах, использование которых позволяет создание объемных преобразователей электромагнитных колебаний в широком диапазоне частот и мощностей.

Ключевые слова: преобразователи, ферриты, электромагнитный импульс

Основные свойства ферритов на сверхвысоких частотах (СВЧ). Для преобразования мощных СВЧ импульсных сигналов необходимы безынерционные датчики-преобразователи, нечувствительные к перегрузкам и обладающие высокой надежностью, стабильностью параметров во времени. Материалом, пригодным для создания таких датчиков, являются ферриты. Ферриты уникальны по своим свойствам. Один только эффект ферромагнитного резонанса (ФМР) открывает многообразные возможности для СВЧ электротехники. Ферриты нечувствительны к перегрузкам, длительность переходных процессов в них, определяемых временем релаксации, меньше 0,2 нс. Возможность гибкого электрического управления резонансной частотой в широком диапазоне, высокая надежность и избирательность делают целесообразным использование ферритов для создания датчиков-преобразователей параметров СВЧ сигналов.

Эффект ФМР заключается в резонансном поглощении ферромагнитным веществом, находящимся в постоянном магнитном поле напряженностью H_0 , энергии СВЧ электромагнитного поля. Резонансная частота ω_p т.е. частота ФМР, определяется, как известно, значением напряженности постоянного намагничивающего поля. В частности, для изотропного, намагниченного до насыщения сферического образца малых размеров

$$\omega_p = \gamma H_0,$$

где $\gamma = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м; $g = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Если при постоянном значении напряженности H_0 магнитного поля менять частоту электромаг-

нитного поля, воздействующего на расположенный в волноводе ферритовый образец, то такой элемент СВЧ тракта обнаружит свойства режекторного фильтра. Аналогичный эффект будет наблюдаться, если при постоянной частоте ω_p менять значение напряженности H подмагничивающего поля (рис. 1).

Key words: converters, ferrites, electromagnetic impulse

нитного поля, воздействующего на расположенный в волноводе ферритовый образец, то такой элемент СВЧ тракта обнаружит свойства режекторного фильтра. Аналогичный эффект будет наблюдаться, если при постоянной частоте ω_p менять значение напряженности H подмагничивающего поля (рис. 1).

Известное математическое описание ФМР является приближенным. Рассматривается движение суммарного вектора намагниченности \vec{M} ферромагнетика в магнитном поле эффективной напряженностью $\vec{H}_{эф}$, в общем случае слагаемом из внешних и внутренних полей феррита (рис. 2).

Движение суммарного вектора намагниченности является прецессионным и описывается уравнением Ландау–Лифшица, аналогичным уравнению механического волчка в поле силы тяжести [1]:

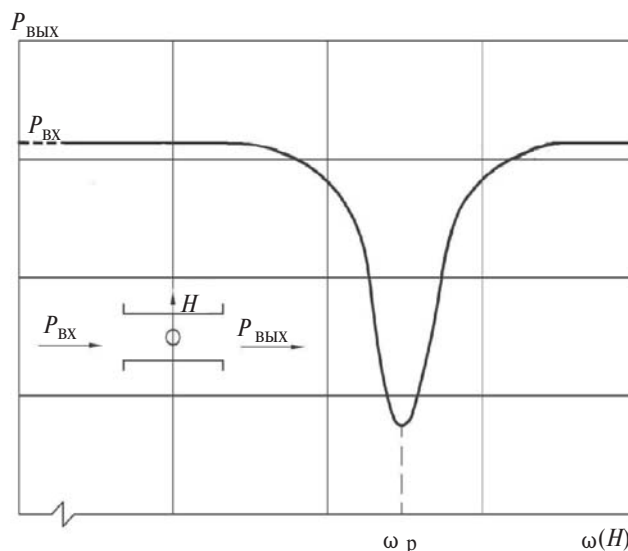


Рис. 1. Кривая поглощения СВЧ энергии при ферромагнитном резонансе

¹ Работа проводилась при поддержке и для реализации ФЦП Научные научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг. Контракт № П1011.

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -m_0 g [\bar{M} \bar{H}_{эф}] + \bar{R},$$

где \bar{R} – диссипативный член, учитывающий потери.

Спектр колебаний вектора намагниченности содержит бесконечное число их типов. Однако при малых мощностях СВЧ воздействия вся энергия передается только простейшему из них, так называемой однородной прецессии, и ее амплитуда существенно (на несколько порядков) больше амплитуд остальных типов. При определенных условиях, в частности при больших мощностях СВЧ электромагнитного поля, может резко увеличиться и амплитуда других, так называемых неоднородных типов колебаний намагниченности. Возбуждение неоднородных типов прецессии свидетельствует о протекании в ферритовом образце сложных нелинейных процессов и обычно сопровождается искажением формы резонансной кривой образца.

Использование нелинейных явлений для преобразования СВЧ импульсных электромагнитных колебаний. Для преобразования СВЧ импульсных электромагнитных колебаний интерес представляют следующие эффекты в ферритах на СВЧ:

1. Стабильные нелинейные эффекты (детектирование, смещение, кроссумножение и умножение частоты).

2. Нестабильные нелинейные эффекты (насыщение основного резонанса, дополнительный резонанс, совпадение основного и дополнительного резонансов, усиление, генерирование).

Несомненно, каждый нелинейный эффект в ферритах может быть использован для создания объемных преобразователей импульсных СВЧ колебаний в определенном диапазоне мощностей и частот. Такими объемными преобразователями являются ферритовые: детектор; смеситель; кроссумножитель; умножитель; генераторный датчик и т.д.

Чаще всего объемные ферритовые преобразователи используются в измерителях импульсной или спектральной плотности мощности импульсных СВЧ колебаний. Кратко рассмотрим нелинейные явления в ферритах, используемых в этих преобразователях.

Нелинейные гиромагнитные свойства ферритов при малых уровнях СВЧ мощности с достаточной степенью точности описываются уравнением движения гиромагнитного момента, нелинейным по отношению к полным напряженностям поля и намагниченности. Теоретический анализ стабильных, т.е. не связанных с возбуждением возрастанием амплитуд колебаний, явлений приводится в [1, 2] и заключается в решении уравнения движения вектора намагниченности относительно его переменной

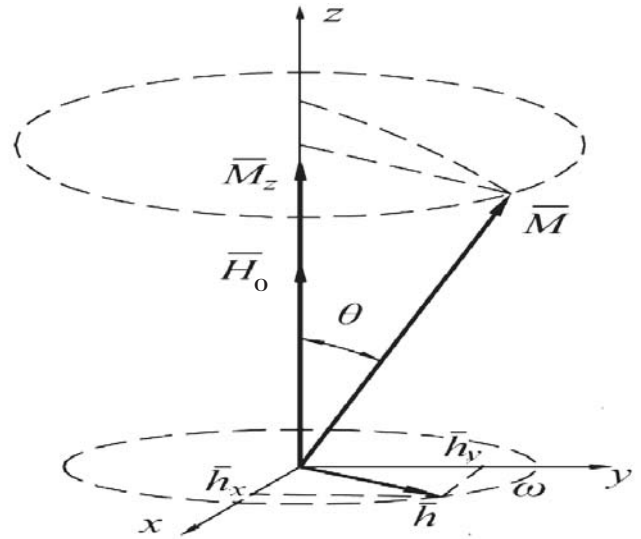


Рис. 2. Картина прецессионного движения вектора намагниченности ферромагнитного образца

составляющей m_z с учетом закона сохранения значения намагниченности ($|\bar{M}| = \text{const}$) при малых амплитудах напряженности СВЧ магнитного поля ($h < H_0$). Вектор напряженности воздействующего на феррит переменного СВЧ поля можно представить как

$$\bar{h} = \bar{h}_1 + \bar{h}_2,$$

где $\bar{h}_1 = \bar{h}_{10} e^{i\omega_1 t}$ и $\bar{h}_2 = \bar{h}_{20} e^{i\omega_2 t}$ – переменные СВЧ поля круговой поляризации в плоскости, перпендикулярной направлению постоянного подмагничивающего поля, с частотами ω_1 и ω_2 . Решение для m_z выглядит в следующем виде [8]:

$$m_z = M_0 \cdot \frac{A_1^2 + B_1^2 + A_2^2 + B_2^2}{2M_0} - \frac{A_1 B_1 \sin 2\omega_1 t - A_2 B_2 \sin 2\omega_2 t}{M_0} - \frac{(A_1 A_2 + B_1 B_2) \cos(\omega_1 - \omega_2) + (A_1 B_1 - A_2 B_2) \sin(\omega_1 - \omega_2)}{M_0},$$

где M_0 – намагниченность насыщения; A_1, A_2, B_1, B_2 – коэффициенты, зависящие от амплитуд напряженностей h_{10}, h_{20} и частот ω_1, ω_2 воздействующих на феррит СВЧ полей и параметров ферритового образца.

Второй, третий и четвертый члены правой части уравнения определяют эффекты детектирования, удвоения и смещения соответственно. Каждый из этих эффектов может быть использован для измерения импульсной СВЧ мощности. Однако практический интерес представляют лишь эффекты детектирования и смещения с выделением разностной частоты.

Наиболее простыми конструктивно и в эксплуатации являются, безусловно, ферритовые детекторные датчики (ФДД). Такой ФДД представляет собой помещаемое в волновод ферритовое тело с намотанной на него катушкой индуктивности, с помощью которой проводится отбор выходного напряжения. Малый коэффициент передачи ФДД не позволяет использовать эффект детектирования для измерения малых уровней мощности, но для преобразования средних и больших уровней мощности использование ФДД весьма удобно. Существенным недостатком ферритовых детекторных датчиков является зависимость амплитуды выходного напряжения от формы СВЧ импульсов, а именно от длительности фронтов измеряемых импульсов. Влияние формы импульсов на погрешность преобразования может быть уменьшено соответствующим выбором параметров (добротности) низкочастотного контура, образованного катушкой и входной емкостью последующего измерительного устройства [3].

Эффект смещения на ферритах позволяет создать преобразователи весьма высокой чувствительности (порядка 10^{-7} Вт и более) [4]. Измерители на ферритовых смесителях могут измерять мощности импульсных сигналов длительностью $t \leq t_r \gg 0,2$ мкс (t_r – время релаксации феррита) и обладают большим динамическим диапазоном (> 60 дБ). К недостаткам измерителей мощности на ферритовых смесителях следует отнести наличие СВЧ гетеродина и малую точность ($\sim 20\%$).

Эффект умножения частоты может быть использован для измерения мощности при наличии измерителей СВЧ мощности на более высокой частоте ($n\omega$). Эффектом, на основе которого на сегодняшний день возможно создание наиболее точных измерителей мощности импульсных СВЧ сигналов при длительностях $t = 0,2, \dots$ мкс, является кроссумножение. В [5, 6] был исследован основанный на этом эффекте датчик-кроссумножитель, выявлена целесообразность разработок измерителей мощности на кроссумножителях в диапазоне длины волн от 8 мм до 20 см для измерения уровней СВЧ мощности от единиц милливольт до единиц вольт.

Для преобразования СВЧ импульсной мощности могут быть применены ферритовые датчики-преобразователи, использующие эффект генерации собственных нутационных синусоидальных колебаний продольной намагниченности феррита, связанного с резонансным контуром. Этот эффект был теоретически предсказан и описан В.А. Фабриковым [7–9], а экспериментально был обнаружен при исследовании ферритового смесителя. Более подробно работа подобных датчиков-преобразователей была исследована В.И. Максимовым. Им

было показано, что датчики-преобразователи нутационных колебаний намагниченности могут разрабатываться для преобразования импульсных СВЧ сигналов длительностью более 0,5 мкс и мощностью в импульсе 5, 60 кВт. Однако необходимо отметить, что эффект автогенерации становится весьма неустойчивым при больших энергиях СВЧ импульсного сигнала вследствие перегрева образца или развития в нем сложных нелинейных процессов. На малых уровнях СВЧ мощности применение описываемых датчиков достаточно удобно. При этом для измерения мощности может быть использована не только зависимость амплитуды генерируемых колебаний, но и зависимость частоты этих колебаний от уровня СВЧ мощности [7].

Измерители мощности, использующие нелинейность коэффициента передачи элемента СВЧ тракта с ферритовым вкладышем, описаны нами в [8, 9]. Такие измерители могут быть применены, в принципе, для относительного и абсолютного измерения импульсной СВЧ мощности в различных диапазонах длины волн, однако для практической реализации требуются широкополосные измерительные аттенюаторы и фазовращатели, точностью калибровки которых в основном и определяется их точность. Так как в настоящее время отечественной промышленностью не выпускаются калиброванные аттенюаторы и фазовращатели для СВЧ трактов высокого уровня мощности, то невозможно и создание таких измерителей для них. То же самое можно сказать и о пороговых измерителях мощности.

Тем не менее, эти возможности необходимо иметь в виду, так как подобные измерители мощности, особенно пороговые, могут оказаться весьма полезными, например в качестве простых индикаторов номинального уровня мощности передатчиков радиолокационных станций или в качестве индикаторов эталонных уровней мощности в различных точках СВЧ диапазона [10].

Нелинейные эффекты в ферритах при больших уровнях СВЧ мощности. Названные в предыдущем параграфе нелинейные эффекты наблюдаются при сравнительно малых и средних уровнях СВЧ мощности и могут быть использованы для непосредственного контроля и измерения соответственно малых и средних уровней мощности. Для контроля и измерения высоких и сверхвысоких уровней мощности необходимы нелинейные эффекты, устойчиво проявляющиеся при таких уровнях мощности. Известно, что при больших уровнях мощности спиновая система ферромагнетика сильно возбуждена (ферромагнетик находится в режиме нелинейного ферромагнитного резонанса (НФМР)). В ряде работ научного коллектива под руководством Я.А. Моносова [11–13] теоретически и экспери-

ментально показано, что НФМР обладает универсальным свойством — неустойчивостью. Доказательство универсальности этого свойства является фундаментальным фактом для теории НФМР. Неустойчивость НФМР приводит к медленному изменению во времени амплитуд параметрически возбужденных спиновых волн. Интегральным проявлением существования неустойчивости спиновых волн являются экспериментально наблюдаемые при НФМР медленные изменения во времени (осцилляции) макроскопической намагниченности ферритового образца. В настоящее время в литературе за явлением неустойчивости НФМР закрепился термин «автомодуляция».

В указанных выше публикациях убедительно доказано, что причиной автомодуляции в ферромагнетике является запаздывание изменений продольной составляющей намагниченности относительно изменений поперечных составляющих. Такое запаздывание описывается, например, блоховским механизмом релаксации [14]. Инерционность продольной намагниченности приводит к периодическому изменению условий параметрического возбуждения спиновых волн и в результате — к периодическому изменению амплитуды последних. Следует отметить, что неустойчивость наблюдается во всех опытах по НФМР. Однако в зависимости от условий эксперимента неустойчивость НФМР может иметь специфические особенности. Одним из авторов статьи была экспериментально обнаружена и описана [15–18] неустойчивость НФМР в системе «феррит–контур» при возбуждении в ферритовом образце под действием СВЧ поля поперечной накачки спиновых волн половинной частоты, т.е. при дополнительном резонансе. Под системой «феррит–контур» при этом понимается устройство, схематически представленное на рис. 3. Помещенный в волновод ферритовый образец, например сфероидальной формы, охватывается в экваториальной плоскости спиральной катушкой. Выводы катушки за пределами волновода подключаются к конденсатору емкостью C . В результате образуется резонансный контур, взаимодействующий с ферритовым образцом.

В.А. Фабриков показал, что система «феррит–контур» в режиме основного ФМР может быть неустойчива даже до порога возбуждения спиновых волн. Экспериментальное исследование этого эффекта, как уже говорилось выше, выявило целесообразность использования его для измерения малых и средних уровней СВЧ мощности. Однако при больших уровнях СВЧ мощности неустойчивость в системе «феррит–контур» на основном резонансе приобретает шумовой характер и мало пригодна для использования в датчиках-преобразо-

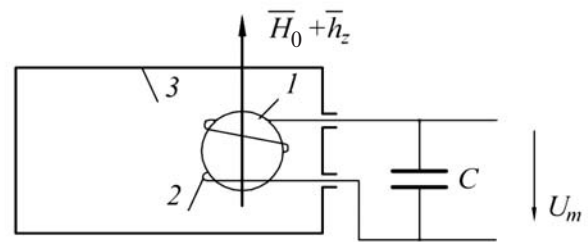


Рис. 3. Система «феррит–контур»: 1 — ферритовый образец; 2 — катушка; 3 — волновод

вателей временных и энергетических параметров СВЧ импульсных сигналов.

Неустойчивость НФМР в системе «феррит–контур» на дополнительном резонансе наблюдалась автором практически во всех известных монокристаллических материалах со структурой гранат в диапазоне длины волн от 3 до 20 см и мощностях от 1 киловатта до нескольких десятков мегаватт. По сравнению с автомодуляцией она имеет много больший динамический диапазон существования когерентных колебаний (~ 25 дБ) и больший диапазон изменения их частоты (рис. 4.). Происходит это, видимо, вследствие уменьшения устойчивости колебаний спиновой системы и одновременного увеличения устойчивости медленных колебаний из-за реакции резонансного контура. Проявлением неустойчивости НФМР в системе «феррит–контур» является генерация высокочастотных (единицы и десятки мегагерц) колебаний в резонансном контуре. Эти колебания плавно возникают при некотором пороговом значении напряженности СВЧ магнитного поля, носят синусоидальный характер и имеют огибающую, соответствующую при малых отклонениях огибающей СВЧ импульса (рис. 5). Значение пороговой мощности зависит от добротности резонансного контура, а ам-

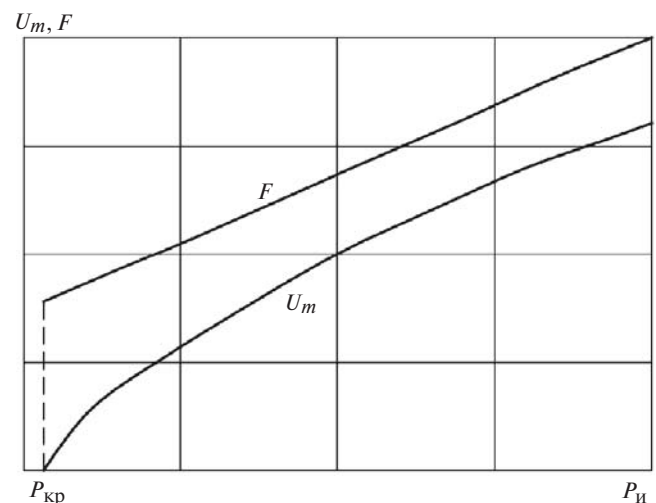


Рис. 4. Зависимость амплитуды и частоты автогенерации от СВЧ мощности

плитуда и частота колебаний — от значения СВЧ мощности (рис. 4). Это обстоятельство и позволяет использовать неустойчивость НФМР в системе «феррит–контур» для измерения импульсной СВЧ мощности высокого (от 1 кВт до 1 МВт) и сверхвысокого (свыше 1 МВт) уровня. Для краткости будем в дальнейшем этот эффект называть эффектом автогенерации.

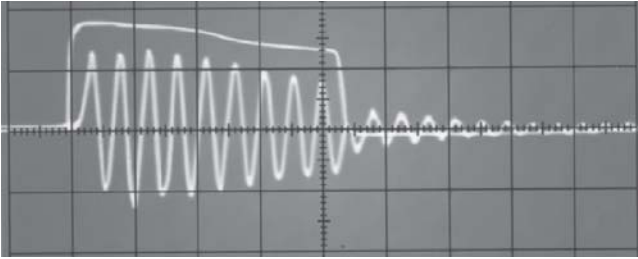


Рис. 5. Форма огибающей СВЧ импульса и сигнала на емкости резонансного контура

Если ферритовый образец в системе «феррит–контур» закреплять не неподвижно, а помещать свободно в некоторой полости, то вследствие возбуждения в образце магнитоакустического резонанса наблюдается сложное взаимодействие спиновой системы с акустическими колебаниями и колебаниями в резонансном контуре. От значения импульсной СВЧ мощности зависит только амплитуда колебаний. Этот эффект устойчиво наблюдался автором и на основном, и на дополнительных резонансах и может быть также использован в датчиках-преобразователях импульсной и непрерывной СВЧ мощности. Таким образом, в настоящее время резонансные датчики-преобразователи можно разрабатывать на уровне мощности от 10^{-7} до 10^7 Вт. Рассмотрим динамический диапазон ферритовых резонансных устройств.

Динамический диапазон ферритовых резонансных датчиков-преобразователей. Важнейшей характеристикой резонансного ферритового устройства является форма резонансной кривой образца, используемого в устройстве, на частоте однородной прецессии намагниченности. Уровень поглощения и ширина резонансной кривой определяют обычно все технические данные любого резонансного устройства. Поэтому для перестраиваемых по частоте ферритовых СВЧ устройств важно сохранение формы резонансной кривой как гарантии стабильности, постоянства технических данных в диапазоне перестройки.

Как известно, ширина резонансной кривой определяется магнитными потерями в ферритах. Электромагнитная энергия, связанная с прецессией намагниченности, передаётся в конечном счете кристаллической решетке ферромагнетика, превращаясь в энергию ее тепловых колебаний. Эта пере-

дача может происходить или непосредственно при взаимодействии тепловых колебаний (фононов) кристаллической решетки со спинами электронов (магнонами), или же в результате более сложных процессов. Вероятность непосредственного взаимодействия очень мала. В ферромагнитных полупроводниках передача энергии от прецессии намагниченности (магнонов с $k=0$, k — волновое число) кристаллической решетке может происходить либо в результате процессов рассеяния с одновременным образованием фонона (Φ) и магнона (M), либо в результате процессов [12]:

$$a) M_{k \gg 0} \otimes M_{k > 0} \text{ и } б) M_{k > 0} \otimes \Phi.$$

Вероятность процессов рассеяния весьма мала. Таким образом, механизмом, объясняющим магнитные потери в магнитных полупроводниках, является совместное протекание процессов $a)$ и $б)$. Эти процессы протекают ступенчато. Причем $M_{k > 0} \otimes \Phi$ происходит весьма эффективно. Поэтому время релаксации материала зависит в основном от процесса $a) M_{k=0} \otimes M_{k > 0}$. При увеличении вероятности процесса $a)$ уменьшаются время релаксации феррита t_r , и в соответствии с формулой $2DH = \omega_r / \eta_0 g = 2p / \eta_0 g t_r$ увеличивается ширина кривой ферромагнитного резонанса $2DH$ (здесь ω_r — частота релаксации). Вероятность процесса увеличивается, как показали Клогстон, Сул и др., при выполнении условий:

1. Равенство энергий магнонов $k \gg 0$ и $k > 0$ т.е. с классической точки зрения совпадение частот (вырождение) соответствующих типов прецессии.

2. Наличие магнитных неоднородностей:

а) микроскопической неоднородности структуры материала;

б) макроскопических неоднородностей, обусловленных шероховатостью образца;

в) неоднородностей, вызванных элементами конструкции устройства.

В.А. Кривченко и А.И.Пильшиков прибавляют к этим двум условиям третье.

3. Наличие связи между типами прецессии по анизотропии.

Связь между типами прецессии возникает также при больших амплитудах однородной прецессии вследствие нелинейности уравнения Ландау–Лифшица.

Опасность нарушения работы резонансного перестраиваемого ферритового СВЧ устройства из-за возбуждения неоднородных типов прецессии может быть значительно уменьшена или совсем преодолена при принятии следующих мер:

а) ориентации постоянной намагниченности по одной из главных осей кристалла;

- б) правильном выборе материала по намагниченности насыщения;
- в) выборе конструкции устройства, минимально искажающей однородность СВЧ поля вблизи ферритового образца;
- г) тщательной обработке поверхности ферритового образца;
- д) использовании образцов сферической формы;
- е) использовании материала с малым значением $2DH$;
- ж) работе при малых мощностях.

При уменьшении рабочей частоты ферритовых устройств возникает несколько трудностей. Главная из них — рост магнитных потерь в материале, не полностью намагниченном постоянным полем, которое требуется для резонанса на низких частотах. Эти потери объясняются естественным ферромагнитным резонансом во внутренних полях, вызванных доменами, существующими при отсутствии насыщения, и анизотропией. Д. Полдер и Дж. Смит показали, что максимальная частота, при которой происходят такие потери в малых полях, пропорциональна намагниченности насыщения феррита. Поэтому уменьшение намагниченности насыщения ферритов дает возможность использовать их на более низких частотах.

Другим фактором, затрудняющим создание ферритовых резонансных устройств в дециметровом диапазоне длины волн, является влияние магнитостатических типов прецессии. В дециметровом диапазоне особенно широк спектр частот вырождения однородной прецессии с высшими типами колебаний намагниченности, и поэтому соответственно существует наибольшая опасность возбуждения связанных с однородной прецессией высших типов колебаний. Однако чем ниже намагниченность насыщения феррита, тем на более низкие частоты сдвигается участок наибольшей плотности спектра частот вырождения.

Следующая трудность, возникающая при разработке ферритовых устройств дециметрового диапазона, связана с понижением добротности устройства при увеличении его размеров пропорционально длине волны [14, с. 46]. Из теоретических выражений для добротности следует, что параметры устройств в дециметровом диапазоне улучшаются при использовании материалов с относительно более узкими резонансными кривыми. И, наконец, четвертая трудность — проблема больших габаритов и массы дециметровых ферритовых устройств. Она может быть частично решена применением прямоугольного волновода с уменьшенной высотой, а также переходом на коаксиальные и полосковые конструкции устройств.

Краткое рассмотрение этих четырех моментов показывает, что ограничения возможности создания устройств, использующих ферромагнитный резонанс в дециметровом диапазоне, могут быть преодолены при использовании материалов с низкой намагниченностью насыщения (не большей 4,8–10 А/м) и с узкими резонансными кривыми (не более 80 А/м). В иностранной литературе есть упоминание о монокристаллах иттриевого феррита — галлата с индукцией насыщения, равной $(0,8–4,8)10^4$ А/м и шириной линии поглощения 40 А/м [18, с. 607]. Кроме монокристалла иттриевого феррита — галлата $Y_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ в настоящее время известны и другие материалы с малой намагниченностью насыщения. В их числе можно назвать монокристалл иттрий-гадолиниевого граната $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$, монокристалл гадолиниевого граната $Gd_3Fe_5O_{12}$, монокристалл кальций-висмут-ванадиевого граната $Bi_{3-2x}Ca_{2x}Fe_{5-x}V_xO_{12}$. Однако лишь последний из указанных монокристаллов обладает магнитными характеристиками, весьма близкими к железоиттриевому гранату, позволяющими использовать его в резонансных устройствах в диапазоне частот выше 1000 МГц. Некоторые перспективы в продвижении ферритовых резонансных устройств в сторону низких частот открываются при нагреве феррита.

Рассмотрим теперь факторы, определяющие верхний предел возможных разработок ферритовых высокоизбирательных устройств. В миллиметровом диапазоне длины волн влияние магнитостатических типов прецессии проявляется значительно меньше. Однако это не означает, что в миллиметровом диапазоне этого влияния совсем нет. Для того чтобы гарантировать нормальную работу резонансных устройств в этом диапазоне, необходимо, как и в других диапазонах, использовать образцы с тщательно обработанными поверхностями, выбирать конструкцию устройства, минимально искажающую однородность СВЧ поля, и т.д.

В миллиметровом диапазоне возникает другая проблема. Для работы ферритового элемента в режиме ферромагнитного резонанса нужны большие магнитные поля, из-за чего значительно увеличивается масса магнитной системы. Естественно, в устройствах, масса которых не лимитирована, могут использоваться и достаточно громоздкие магнитные системы. Можно в некоторой степени уменьшить массу устройства, применив электромагниты из материалов с большой индукцией насыщения (например АРМКО). Мерой, радикально уменьшающей вес магнитной системы, является использование магнитоодноосных ферритов с большими полями анизотропии. К сожалению, известные магнитоодноосные ферриты имеют боль-

шую ширину кривой ферромагнитного резонанса (не менее 800–1200 А/м). Поэтому в диапазоне длины волн короче 8 мм создание высокоизбирательных ферритовых резонансных устройств затруднительно.

На основании изложенного можно сделать вывод о принципиальной возможности создания высокоизбирательных объемных ферритовых датчиков-преобразователей импульсной СВЧ мощности в диапазоне длины волн от 8 мм до 30 см, а при использовании ферритовых образцов в режиме дополнительного поглощения — от 8 мм до 40 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Китайцев. Феноменологическое описание прецессии намагниченности в монокристаллах ферритов. — Вестник МЭИ, 2003, №6.
2. Микаэля А.Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
3. Богданов Г.Б. Основы теории и применение ферритов в технике измерений и контроля. — М.: Советское радио, 1967.
4. А. с. № 25547. Ферритовый смеситель/Л.К. Михайловский, В.Ф. Балаков, Б.П. Поллак. — БИ, 1962, №8.
5. А. с. № 163226. Способ абсолютного селективного по частоте измерения напряженности магнитного поля СВЧ колебаний и мощности в импульсе/Л.К. Михайловский. — БИ, 1964, № 12.
6. Михайловский Л.К., Балаков В.Ф., Пучков В.С., Радченко В.Ф. Исследование ферритовых кроссумножителей и возможности их использования для измерения импульсной и непрерывной СВЧ мощностей. — Доклады НТК по итогам НИР. — Изд. МЭИ, 1966.
7. Шакирзянов Ф.Н., Антонен Е.П. Об использовании частотных характеристик нелинейных гиромангнитных эффектов для измерения СВЧ мощности. — Доклады НТК по итогам НИР за 1968–1969 гг. — Изд. МЭИ, 1969.
8. Михайловский Л.К., Шакирзянов Ф.Н. О возможности использования нелинейных гиромангнитных эффектов для измерения СВЧ мощности в импульсе. — Доклады НТК по итогам НИР за 1966–1967 гг. — Изд. МЭИ, 1967.
9. Шакирзянов Ф.Н. Измерители мощности на ферритах. — Сб. трудов УПИ им. С.М. Кирова, 1969, № 183.
10. Шакирзянов Ф.Н., Антонен Е.П. Селективный ферритовый измеритель импульсной и непрерывной СВЧ мощности. — Доклады НТК по итогам НИР за 1968–1969 гг. — Изд. МЭИ, 1969.
11. Моносов Я.А. Нелинейный ферромагнитный резонанс. — ЖЭТФ, 1967, № 5(11).
12. Зубков В.И., Моносов Я.А. Автомодуляция при нелинейном ферромагнитном резонансе. — Радиотехника и электроника, 1968, № 10.
13. Моносов Я.А., Суринов В.В. Анизотропия автомодуляции. — ФТТ, 1967, № 9.
14. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики. — М.: Мир, 1965.
15. Шакирзянов Ф.Н. Нутационные колебания намагниченности ферромагнетика при нелинейном ферромагнитном резонансе. — Тезисы доклада на Всесоюзном совещании по физическим свойствам монокристаллов ферритов. — Красноярск, 1969.
16. Михайловский Л.К., Шакирзянов Ф.Н. Нутационные колебания намагниченности ферромагнетика при нелинейном ферромагнитном резонансе. — Радиотехника и электроника, 1969, № 11.
17. Шакирзянов Ф.Н., Антонен Е.П. Нутационные колебания намагниченности и нелинейные гиромангнитные эффекты в ферритах при дополнительном резонансе. — Доклады НТК по итогам НИР за 1968–1969 гг. — Изд. МЭИ, 1969.
18. Шакирзянов Ф.Н., Антонен Е.П. Нутационные колебания намагниченности в феррите на основном и дополнительном резонансе. — Тезисы докладов на XXV Всесоюзной научной сессии, посвященной дню радио и связиста. — М.: НТО РЭС им. А.С. Попова, 1969.

[10.05.11]

Авторы: Шакирзянов Феликс Нигматзянович окончил Уральский политехнический институт в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование ферритового преобразователя в режиме нелинейного ферромагнитного резонанса» в 1970 г. в Московском энергетическом институте (МЭИ). Профессор кафедры теоретических основ электротехники МЭИ (ТУ).

Никифоров Виктор Андреевич окончил МЭИ в 2006 г. Главный специалист ЗАО СП Энергосетьстрой.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).