

MAGNETISM AT MICROWAVES

A. G. GUREVICH

A new branch of science and technology – microwave magnetic dynamics arose at the interface of magnetism and radio-physics. Magnetic devices became an integral part of microwave systems in radar, communication, and experimental physics. The behavior of magnetic materials at high frequencies as well as the principles of their application at microwaves and in optical frequency range are described.

На стыке магнетизма и радиофизики возникло новое направление – СВЧ магнитная динамика. Магнитные устройства стали неотъемлемой частью СВЧ-систем в радиолокации, связи и экспериментальной физике. Рассматриваются поведение магнитных материалов на высоких частотах и пути их использования в СВЧ- и оптическом диапазонах.

© Гуревич А.Г., 1999

98

МАГНЕТИЗМ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

А. Г. ГУРЕВИЧ

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Магнетизм является универсальным свойством материи [1, 2]. Накопление сведений, а затем и целенаправленное исследование магнитных явлений велись на протяжении многих веков. В 1820 году Х. Эрстед, обнаружив магнитное поле электрического тока, открыл связь магнитных явлений с электрическими. Открытие электромагнитной индукции М. Фарадеем в 1831 году положило начало изучению и использованию динамических магнитных процессов. Возникла электротехника, которая потребовала использования магнитных материалов в переменных полях промышленной частоты. Создание Дж. Максвеллом теории электромагнитного поля стимулировало возникновение радиотехники, которая, в свою очередь, потребовала применения магнитных материалов на радиотехнических частотах.

В опытах Г. Герца и А.С. Попова, положивших начало радиотехнике, использовались волны с длинами в единицы и десятки сантиметров. По современной терминологии, они относятся к диапазону сверхвысоких частот (СВЧ), который включает волны с частотами приблизительно 1–100 ГГц, то есть с длинами волн от ~30 см до долей миллиметра. Однако в дальнейшем радиотехника пошла по пути использования более низких частот. В качестве магнитных материалов на этих частотах использовались ферромагнитные металлы в виде тонких лент или порошков (для уменьшения потерь на вихревые токи), а затем и неметаллические магнитные материалы – ферриты [3].

Дальнейшее развитие радиотехники потребовало освоения на новой основе диапазона сверхвысоких частот. Оно началось в 30-е годы и получило в предвоенные и военные годы мощный импульс, обусловленный необходимостью разработки радиолокационной аппаратуры. За короткий срок были разработаны генераторы этого диапазона и создана новая техника линий передачи, использующая полые металлические волноводы и резонаторы.

В первое время, до начала 50-х годов, техника СВЧ, в частности радиолокационная, не нуждалась в магнитных материалах, поскольку те задачи, для решения которых эти материалы использовались на более длинных волнах, в диапазоне СВЧ решались с помощью волноводов и резонаторов, без применения магнитных материалов. Однако дальнейшее развитие радиолокации потребовало для повышения

помехоустойчивости создания мощных широкодиапазонных систем, способных быстро переходить с одной частоты на другую. Генераторы и приемники для таких систем были созданы. Однако выяснилось, что мощные перестраиваемые генераторы не могут работать на достаточно удаленную антенну из-за эффекта длинной линии (влияния отраженной от антенны волны на частоту генератора). Выход был найден в создании устройств (не очень удачно названных вентилями) для защиты генератора от отраженной от антенны мощности. Они принадлежат к числу невзаимных устройств, имеющих существенно различные характеристики для разных направлений распространения.

Успехи, которые были достигнуты к тому времени в области исследования динамических магнитных процессов, обеспечили возможность создания с использованием магнитных материалов невзаимных, а также управляемых устройств СВЧ-диапазона. В начале 50-х годов были разработаны многие типы таких устройств. Поскольку применение металлических магнетиков неэффективно в СВЧ-диапазоне из-за сильного скин-эффекта, были использованы ферриты. И как это всегда бывает, потребности техники стимулировали постановку и решение многих фундаментальных задач магнитной динамики. Для более детального ознакомления с ними может быть использована монография [4].

ФЕРРОМАГНЕТИКИ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Поведение магнитных материалов в переменных полях промышленной частоты и не очень высоких радиочастот можно считать квазистатическим. Оно определяется полями, которые существуют в веществе в данный момент независимо от скорости их изменения (но, конечно, с учетом магнитной истории образца, то есть гистерезиса). С ростом частоты такой подход перестает быть справедливым. Сначала еще в коротковолновой части диапа-

зона радиочастот оказывается динамика доменных стенок [5]. В интересующем нас СВЧ-диапазоне проявляется динамика магнитных моментов вещества как внутри доменов, так и в намагниченном до насыщения образце.

В основе магнитной динамики лежит уравнение движения, установленное в 1935 году Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшицем [6]:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{эфф}} + \mathbf{R}, \quad (1)$$

где \mathbf{M} – намагниченность, $\mathbf{H}_{\text{эфф}}$ – эффективное поле, которое включает кроме “настоящего” магнитного поля эффективные поля, учитывающие все виды энергии вещества; γ – магнитомеханическое отношение (отношение магнитного момента к механическому [4]), а \mathbf{R} – диссипативный член, учитывающий потери энергии. В гауссовой (СГС) системе единиц, которую мы используем, опуская часто размерности приводимых численных величин, $\gamma = 1,76 \cdot 10^7$.

Решение уравнения (1) для случая малых колебаний с частотой ω показывает, что высокочастотная магнитная проницаемость (отношение амплитуд переменной магнитной индукции и переменного магнитного поля) является несимметричным тензором вида

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{vmatrix} \mu & i\mu_a & 0 \\ -i\mu_a & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Его поперечные компоненты μ и μ_a (рис. 1) проходят через резонанс при $\omega = \gamma H_0$, где H_0 – магнитное поле, направленное по третьей оси (оси z) тензора (2). Такая резонансная зависимость является причиной ферромагнитного резонанса. Это явление было предсказано на основе классических представлений В.К. Аркадьевым еще в 1912 году и на основе квантовых представлений Я.Г. Дорфманом в

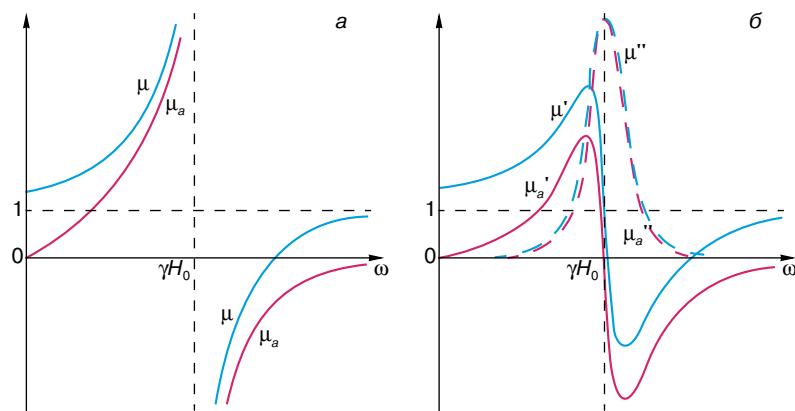


Рис. 1. Компоненты тензора магнитной проницаемости: *а* – без учета, *б* – с учетом потерь ($\mu = \mu' - i\mu''$)

1923 году. Экспериментально ферромагнитный резонанс был обнаружен в 1946 году Дж. Гриффитсом и независимо Е.К. Завойским. Однако частота ферромагнитного резонанса отнюдь не γH_0 . Ч. Киттель объяснил это тем, что внутреннее поле в образце не равно внешнему и зависит от формы образца и намагниченности. Оно должно быть найдено совместно с намагниченностью путем решения соответствующей электродинамической задачи. Если размеры образца малы по сравнению с длиной электромагнитной волны в безграничном пространстве с такими же параметрами (что обычно выполняется в экспериментах по ферромагнитному резонансу), то может быть использовано магнитостатическое приближение. Оно заключается в том, что в уравнениях электродинамики – уравнениях Максвелла – отбрасываются члены с производными по времени от переменных электрического и магнитного полей, в результате чего амплитуды этих полей удовлетворяют таким же уравнениям, как и постоянные поля, соответственно электрическое и магнитное. И если образец имеет форму эллипсоида (в частности, сферы или тонкой пластинки), то частота ферромагнитного резонанса дается формулой, которую получил в 1948 году Ч. Киттель:

$$\omega = \{[H_0 + M_0(N_x - N_z)][H_0 + M_0(N_y - N_z)]\}^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь M_0 – постоянная намагниченность, направленная вдоль одной из осей эллипсоида – оси z , а N_x , N_y и N_z – размагничивающие факторы эллипсоида [4].

Если же размеры образца сравнимы или больше, чем длина электромагнитной волны, то магнитостатическое приближение неприменимо и необходимо решать граничную электродинамическую задачу используя полные уравнения Максвелла и тензорную магнитную проницаемость (2). Остановимся кратко на результатах решения некоторых таких задач.

Рассмотрим круглый волновод с продольно (в направлении оси волновода) намагниченным ферритовым стержнем (рис. 2, a). В таком волноводе могут распространяться волны с круговой поляризацией и разными направлениями вращения относительно направления намагничивания. Они имеют разные фазовые скорости, вследствие чего направление поляризации линейно поляризованной волны, как и в свободном пространстве, поворачивается по мере распространения (эффект Фараdea). Направление поворота не зависит от направления распространения, а определяется только направлением намагничивания. В этом проявляется невзаимность рассматриваемой системы, содержащей намагниченный феррит.

В прямоугольном волноводе с поперечно намагниченной ферритовой пластиной (рис. 2, b) фазовая скорость и затухание, а также распределение переменных электрического и магнитного полей по ши-

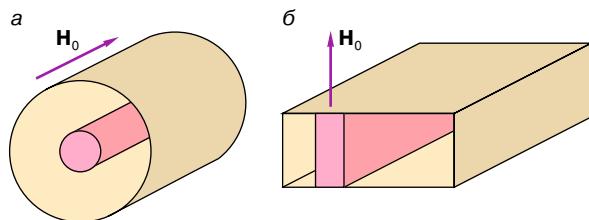


Рис. 2. Волноводы, частично заполненные ферритом

рине волновода невзаимны – зависят от направления намагничивания и направления распространения.

В обширной литературе по электродинамике систем, содержащих среды с тензорными параметрами (см., например, [4]), можно найти решения задач и о резонаторах, содержащих ферритовые образцы, и о волноводных сочленениях с такими образцами. Некоторые их результаты будут упомянуты в следующем разделе в связи с использованием таких систем в устройствах.

Эффективное поле $H_{\text{эфф}}$ в уравнении (1) должно содержать и эффективное поле обменного взаимодействия. Это взаимодействие имеет электростатическую природу, однако вследствие квантовомеханического эффекта оно приводит к тому, что энергия зависит от взаимной ориентации собственных (спиновых) магнитных моментов вещества. Именно это взаимодействие, как показали в 1928 году Я.И. Френкель и независимо В. Гейзенберг, является причиной ферромагнетизма. Эффективное поле обменного взаимодействия включает постоянный член, который не входит в уравнение движения намагниченности (1), и переменный член, зависящий от вариации переменной намагниченности в пространстве. Волны намагниченности, являющиеся решениями уравнения (1) с этим членом, называются спиновыми. Они, как показал в 1930 году Ф. Блох, являются элементарными возбуждениями ферромагнетика и всегда присутствуют в нем тем в большем количестве, чем выше температура. Такие спиновые волны являются некогерентными. Но могут существовать и когерентные спиновые волны, которые возбуждаются переменным магнитным полем СВЧ-диапазона. Эти волны подробно рассматриваются в [4] (см. также [7]).

ФЕРРИТОВЫЕ СВЧ-УСТРОЙСТВА

Как уже отмечалось, магнитные (ферритовые) устройства призваны выполнять в системах СВЧ-диапазона две главные задачи: обеспечение невзаимности (то есть различия поведения системы при разных направлениях распространения энергии) и управление параметрами системы. Рассмотрим сначала первую из них.

Простейшим и самым распространенным невзаимным СВЧ ферритовым устройством является вентиль. Это устройство имеет очень малые потери энергии для одного направления распространения (например, от передатчика к антенне) и очень большие для встречного направления. Наиболее широко применяются вентили трех типов: резонансные, со смещением поля и фарадеевские.

В резонансных вентилях используется то, что поглощение мощности при ферромагнитном резонансе имеет место в переменном магнитном поле с круговой поляризацией и правым направлением вращения относительно направления постоянной намагниченности M_0 (то есть с направлением вращения головки правого винта при поступательном движении винта в направлении M_0). В прямоугольном волноводе с ферритовой пластиной (рис. 2, б) при некотором (близком к четверти ширины волновода) положении пластины переменное магнитное поле в пластине имеет круговую поляризацию с различными направлениями вращения поляризации для различных направлений распространения. Поэтому потери энергии при резонансе оказываются малыми для одного направления распространения и большими для другого.

Вентили со смещением поля (рис. 3) используют то, что распределения переменного электрического поля в волноводе с намагниченной ферритовой пластиной различаются для разных направлений распространения. И может быть найдено положение пластины, для которого электрическое поле на ее поверхности равно нулю для одного из направлений распространения. На эту поверхность помещается поглотитель, например тонкая пленка металла.

В фарадеевском вентиле используется упомянутое выше явление невзаимного поворота поляризации в волноводе – круглом или квадратном, содержащим ферритовый образец. Такой вентиль может рассматриваться как частный случай фарадеевского циркулятора. Циркулятор (рис. 4) – это невзаимное сочленение нескольких волноводов, передающее почти всю мощность из волновода 1 в волновод 2, из

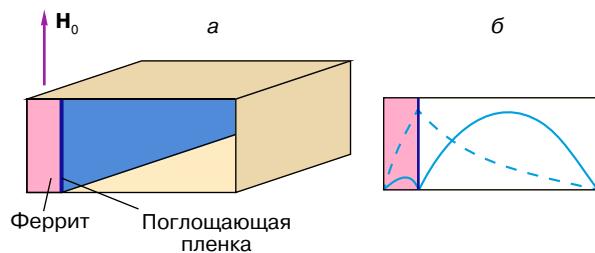


Рис. 3. Ферритовый вентиль со смещением поля:
а – конструкция, б – распределения переменного
электрического поля в поперечном сечении,
сплошные и штриховые линии – для разных на-
правлений распространения

волновода 2 в волновод 3 и т.д. Конструкция циркулятора фарадеевского типа показана схематически на рис. 4, а. Намагниченный ферритовый стержень, находящийся в круглом волноводе, поворачивает на 45° поляризацию волны, поступающей из прямоугольного волновода 1, и волна проходит в волновод 2. Поляризация волны, поступающей из волновода 2, поворачивается на 45° в ту же сторону, и эта волна проходит в волновод 3 и т.д. Если к плечу 1 подключить генератор, к плечу 2 – антенну, а к плечам 3 и 4 – согласованные нагрузки, то рассматриваемое устройство будет вентилем.

Циркулятор может иметь и другое число плеч. Очень распространенным СВЧ ферритовым устройством является так называемый Y-циркулятор (рис. 4, б, в) – симметричное сочленение трех волноводов с намагниченным ферритовым образцом в нем. Типичные параметры циркуляторов: потери в прямом направлении не более 0,5 дБ (потери мощности около 10%), развязка более 20 дБ (проходит не более 1% мощности) в полосе частот – несколько десятков процентов.

Рассмотрим теперь ферритовые СВЧ-устройства, управляемые с помощью магнитного поля. Управлять можно амплитудой, фазой, поляризацией, а также положением частотной характеристики (частотно-селективные устройства). Возможны дискретное управление (например, переключение мощности между каналами), плавное регулирование какой-либо характеристики устройства или периодическое ее изменение (модуляция). Наиболее сложной задачей является при этом достижение максимальной скорости управления, то есть наибольшей частоты модуляции или минимального времени переключения. Они ограничиваются инерционностью управляющего магнитного поля. Однако могут быть достигнуты частоты модуляции порядка мегагерц или времена переключения порядка микросекунды.

Для управления (модуляции, переключения) могут быть использованы циркуляторы. В частности, изменение направления постоянного магнитного поля изменяет направление циркуляции. Но для изменения амплитуды или фазы СВЧ-волны можно использовать ферритовые образцы в волноводе.

Рассмотрим теперь частотно-селективные устройства – фильтры, которые наряду с Y-циркуляторами принадлежат к числу самых распространенных СВЧ ферритовых устройств. Для создания таких устройств может быть использован полый резонатор с ферритовым образцом в магнитном поле. Однако интереснее использовать в качестве резонатора сам ферритовый образец, при этом существенно увеличивается диапазон перестройки и уменьшаются размеры устройства. Частота ферромагнитного резонанса в образце является центральной частотой полосы пропускания такого фильтра. Для уменьшения потерь образец должен иметь узкую линию ферромагнитного резонанса. Поэтому в ферритовых

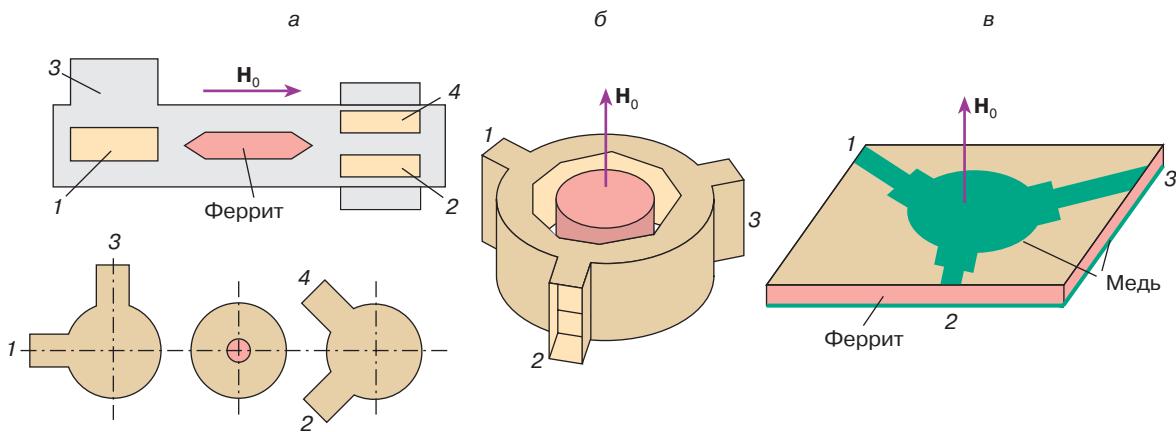


Рис. 4. Циркуляторы: а – фарадеевский, б – волноводный Y-циркулятор, в – микрополосковый Y-циркулятор

фильтрах в отличие от всех рассмотренных выше устройств используются монокристаллические образцы, обычно сферы из железо-иттриевого феррита со структурой граната $Y_3Fe_5O_{12}$ (ЖИГ), который имеет самую узкую резонансную кривую из всех известных магнитных материалов.

На рис. 5 показан ферритовый фильтр, использующий коаксиальные волноводы. Вдали от ферромагнитного резонанса входной и выходной волноводы “развязаны”, так как переменное магнитное поле, создаваемое током входной рамки, вызывает в образце переменную намагниченность, малую по величине и линейно поляризованную в направлении, перпендикулярном к магнитному полю выходной рамки. Вблизи ферромагнитного резонанса переменная намагниченность образца велика, имеет поляризацию, близкую к круговой, и, следовательно, наводит большой ток в выходной рамке, обеспечивая передачу энергии на выход фильтра. Такие фильтры имеют на резонансной частоте потери ~0,5–1 дБ и полосы пропускания – несколько единиц или десятков мегагерц. Перестройка их (изменением магнитного поля) возможна в полосе частот до нескольких октав.

Нелинейные явления, которые возникают в феррите при увеличении амплитуд переменного магнитного поля и переменной намагниченности, могут быть использованы для создания нелинейных

устройств, например ограничителя мощности. Это устройство, мощность на выходе которого, начиная с некоторого уровня входной мощности P_1 , остается почти постоянной вплоть до некоторого уровня P_2 . Таким ограничителем является и рассмотренный ферритовый фильтр при мощности на его входе, превышающей несколько милливатт. Механизм ограничения связан в этом случае с параметрическим возбуждением спиновых волн в образце (см. [4], а также [7]).

Может быть создано и нелинейное устройство с функцией, противоположной функции ограничителя мощности, – подавитель слабых сигналов (его называют также увеличителем отношения сигнала к шуму). Наиболее интересный вариант этого устройства использует когерентные спиновые волны в ферритовой пленке – магнитостатические волны, которые будут рассмотрены ниже.

К нелинейным СВЧ ферритовым устройствам принадлежат также детектор, удвоитель частоты и смеситель. Эффекты детектирования колебаний и получения кратных и комбинационных частот, которые используются в этих устройствах, присущи всем нелинейным системам, к которым принадлежит и ферритовый образец. Из упомянутых устройств только удвоитель частоты нашел некоторое применение в технике СВЧ, остальные не выдерживают конкуренции с полупроводниковыми приборами.

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

В устройствах, о которых речь шла выше, использовались полые металлические волноводы и массивные (не пленочные) ферритовые образцы. Эти устройства были разработаны в основном в 50-е годы. Дальнейшими направлениями работ были миниатюризация устройств и расширение диапазона частот. Успехи в миниатюризации были достигнуты при использовании микрополосковых волноводов, представляющих собой узкие полоски металла на

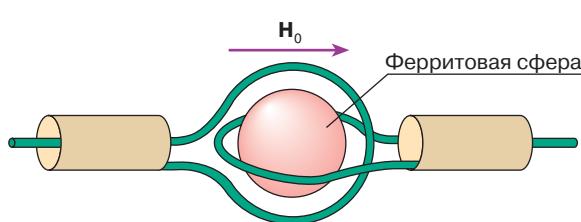


Рис. 5. Коаксиальный ферритовый фильтр

диэлектрической подложке с металлическим экраном на другой ее стороне. С использованием таких волноводов могут быть созданы устройства всех рассмотренных выше типов, кроме фарадеева. На рис. 4, в показан в качестве примера микрополосковый Y-циркулятор.

Дальнейшее продвижение по пути миниатюризации возможно при использовании длинноволновых когерентных спиновых волн (так называемых магнитостатических волн, МСВ) в ферритовых пленках. Такие волны были предсказаны и обнаружены в начале 60-х годов, с тех ведется их интенсивное исследование. Эти волны возбуждаются и принимаются с помощью узких металлических проводников (антенн), расположенных на поверхности пленки. Тип возбуждаемой волны определяется направлением постоянного магнитного поля, как показано на рис. 6. В частности, при магнитном поле, параллельном антенне, возбуждается поверхностная волна (волна Деймона—Эшбаха). Эта волна отличается тем, что она “прижимается” к одной или другой поверхности пленки в зависимости от направления постоянной намагниченности. Вследствие этого проводник, лежащий на поверхности пленки, возбуждает волну, распространяющуюся только в одном направлении. Такая невзаимность, а также одномерность поверхностной волны (наличие только одного ее типа) приводят к тому, что она наиболее широко используется в ферритовых устройствах на основе магнитостатических волн.

Простейшими из этих устройств являются линии задержки — управляемые постоянным магнитным полем или дисперсионные (с задержкой, зависящей от частоты). Они необходимы для обработки сигналов в современных системах радиолокации и связи. Интерес к таким линиям задержки обусловлен тем, что скорость распространения спиновых волн значительно (на несколько порядков) меньше скорости распространения обычных электромагнитных волн в волноводах, и поэтому те же задержки могут быть достигнуты при значительно меньших размерах линии. При допустимых потерях такие ли-

нии позволяют получить время задержки, регулируемое в пределах приблизительно 0,01–1 мкс.

В результате интенсивных исследований были разработаны многие другие СВЧ-устройства на основе магнитостатических волн в ферритовых пленках [8], прежде всего перестраиваемые фильтры и генераторы, а также нелинейные устройства. Рассмотрим в качестве примера лишь одно упомянутое выше нелинейное устройство — подавитель слабых сигналов (рис. 7). При малой входной мощности ток в проводнике эффективно возбуждает поверхностную магнитостатическую волну, которая поглощается в пленке, так что мощность на выходе оказывается малой. При увеличении входной мощности вследствие параметрического возбуждения спиновых волн [4, 7] возбуждение магнитостатической волны становится менее эффективным и потеря сигнала на выходе существенно уменьшаются (рис. 7, б).

Другим актуальным направлением в создании новых СВЧ ферритовых устройств является применение ферритов с большой магнитной кристаллографической анизотропией, например ферритов с гексагональной структурой [3], для создания устройств миллиметрового диапазона. Применение этих материалов вместо ферритов со структурами шпинели или граната, используемых при более низких частотах, позволяет снизить величины постоянных магнитных полей или даже совсем обойтись (в невзаимных устройствах) без внешнего магнитного поля. Наибольшая трудность заключается при этом в получении материалов с достаточно узкой линией ферромагнитного резонанса.

К новым направлениям относится также использование в СВЧ-устройствах структур, состоящих из ферритовых и сверхпроводящих пленок. Открытие высокотемпературных сверхпроводников дает возможность создания устройств, работающих при температуре жидкого азота.

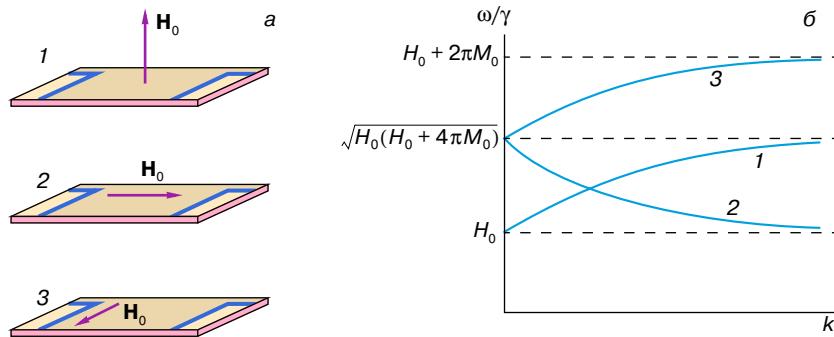


Рис. 6. Магнитостатические волны: а – направления постоянного намагничивания, б – дисперсионные характеристики; 1 – прямая объемная волна, 2 – обратная объемная волна, 3 – поверхностная волна

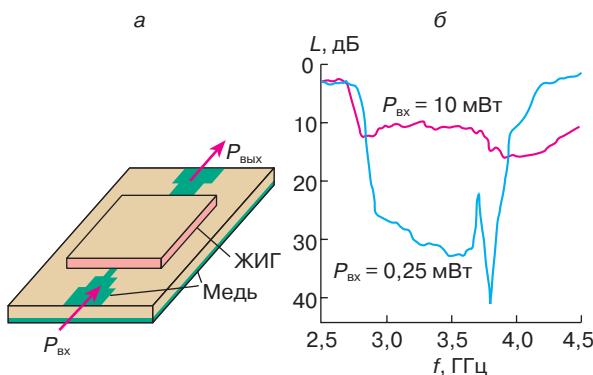


Рис. 7. Подавитель слабых сигналов: а – конструкция, б – частотные характеристики на низком и высоком уровнях мощности, $L = 10\lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}})$

УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

В последнее время оптический диапазон (длины волн – единицы и доли микрометра, то есть частоты 10^5 – 10^6 ГГц) начинает применяться в радиотехнических целях. Разрабатываются и уже созданы линии связи этого диапазона с использованием оптических волоконных волноводов. Это вызывает необходимость создания невзаимных и управляемых магнитных устройств оптического диапазона.

Первым ферритовым устройством оптического диапазона, получившим практическое применение, является фарадеевский вентиль. Схема такого вентиля показана на рис. 8. Входной поляризатор создает волну с линейной поляризацией, ферритовый образец поворачивает ее поляризацию на 45° , и волна проходит в выходной волоконный волновод. Поляризация обратной волны поворачивается ферритовым образцом в том же направлении, эта волна не может пройти через поляризатор и поглощается в устройстве.

Невзаимные и управляемые магнитные устройства могут быть созданы и для оптических систем на пленочных волноводах. Если такие волноводы найдут применение, например, в оптических интегральных схемах для обработки информации, то магнитные элементы, безусловно, войдут в состав этих схем.

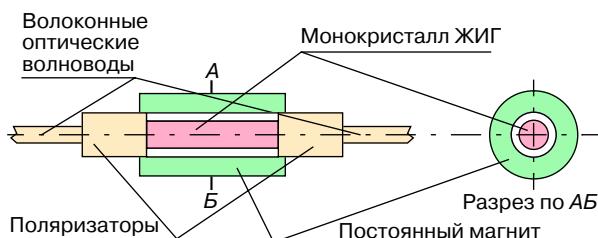


Рис. 8. Фарадеевский вентиль оптического диапазона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные (ферритовые) устройства – невзаимные, управляемые и частотно-селективные (причем часто эти функции бывают совмещены) – прочно вошли в технику СВЧ. По-видимому, по мере расширения применений оптического диапазона в системах связи, радиолокации, радиоуправления магнитные устройства станут и их неотъемлемой частью.

Магнитные устройства (вентили, циркуляторы и др.) стали также необходимыми элементами измерительных приборов и исследовательских установок, в которых применяется СВЧ-диапазон: радиоспектрометров, радиотелескопов, СВЧ-установок для измерения параметров электрических и магнитных материалов. Применение вентилей для защиты генераторов в таких приборах вместо использовавшихся ранее простых (взаимных) аттенюаторов, пожирающих и мощность прямой волны, дает большой выигрыш в точности и чувствительности.

Применение магнитных материалов в СВЧ- и оптическом диапазонах явилось мощным стимулом для фундаментальных исследований проблем магнитной динамики, и прежде всего поведения магнитоупорядоченных веществ в переменных электромагнитных полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1984.
2. Белов К.П., Бочкарев Н.Г. Магнетизм на Земле и в космосе. М.: Наука, 1983.
3. Крутичка С. Физика ферритов. М.: Наука, 1976. Т. 1–2.
4. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Наука, 1994.
5. Барыяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев: Наук. думка, 1986.
6. Ландау Л.Д., Либшиц Е.М. К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел // Ландау Л.Д. Собрание трудов. М.: Наука, 1969.
7. Гуревич А.Г. Спиновые волны // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 9. С. 100–108.
8. Вашковский А.В., Стальмахов В.С., Шараевский Ю.П. Магнитостатические волны в электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1993.

* * *

Александр Григорьевич Гуревич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры физики твердого тела Санкт-Петербургского технического университета, лауреат Государственной премии. Область научных интересов – физика сверхвысоких частот, физика магнитных явлений. Автор более 150 научных работ и изобретений и пяти монографий.