

Д. ф.-м. н. А. Б. РИНКЕВИЧ, акад. РАН В. В. УСТИНОВ,
 д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ, д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН,
 к. г.-м. н. С. М. КЛЕЩЕВА, к. т. н. Е. А. КУЗНЕЦОВ

Россия, г. Екатеринбург, Институт физики металлов УрО РАН;
 г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш»;
 Нижнетагильская гос. социально-педагогическая академия
 E-mail: samoylovich@technomash.ru, rin@imp.uran.ru

Дата поступления в редакцию
 16.04 2008 г.

Оппонент д. ф.-м. н. Е. Н. КАЛАБУХОВА
 (ИФП им. В. Е. Лашкарева, г. Киев)

НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ С 3D-СТРУКТУРОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Изучено влияние электромагнитных волн на наноконпозиты из опаловых матриц, содержащих наночастицы Ni-Zn- и Mn-Zn-ферритов. Измерения выполнены в интервале частот 26—38 ГГц в магнитных полях напряженностью до 30 кЭ.

Опаловые матрицы считаются одним из наиболее перспективных классов материалов для применения в приборах оптического и микроволнового диапазонов. В настоящее время активно исследуются линейные и нелинейные оптические свойства опаловых матриц, фотоиндуцированное поглощение в них, коэффициент преломления, а также изменения интенсивности, поляризации и когерентности, происходящие при прохождении через матрицы мощного когерентного излучения [1]. Ранее были подробно изучены структура и физические свойства опаловых матриц, заполненных металлическими или ферромагнитными наночастицами [2], и рассмотрена специфика оптических свойств двух- и трехмерных объектов на основе опаловых матриц [3]. Наибольший интерес вызывают свойства ансамблей различных наносфер и матриц как фотонных кристаллов [4, 5], поскольку опаловые матрицы считаются классом материалов, пригодных для создания сред с отрицательным показателем преломления. Введение в межферритические пустоты опаловых матриц магнитных материалов стало одним из перспективных направлений развития электронной техники. Никель-цинковый и марганец-цинковый ферриты представляются подходящими материалами для такого заполнения благодаря удачному сочетанию таких свойств как высокое удельное электросопротивление, малые диэлектрические потери, высокая температура Кюри и химическая стабильность. Существующие перспективы применения в устройствах наноэлектроники сверхвысоких частот опаловых матриц как магнитных материалов (метаматериалов) привлекают к ним все возрастающее внимание. Однако магнитные свойства наночастиц существенно отличаются от свойств массивного материала, в частности, для них характерно влияние вклада поверхности наночастиц в магнитную анизотропию, процессы суперпарамагнитной релаксации [6, 7].

Высокочастотные и радиочастотные магнитные свойства ансамблей наночастиц имеют определенную специфику [8], поэтому микроволновые свойства рассматриваемых 3D-наноконпозитов на основе опаловых матриц находятся в связи с их магнитным состоянием. Микроволновые методы исследования представляются перспективными, поскольку дают возможность сравнительно просто оценить динамические и релаксационные параметры таких материалов. В то же время, применяя волноводы и полые резонаторы, работающие на разных типах волн, можно осуществлять различную взаимную ориентацию микроволновых полей и внешнего магнитного поля и таким образом добиться условий наиболее эффективного взаимодействия наночастиц введенного вещества с полями.

Микроволновые свойства наночастиц Ni-Zn-феррита, так же как и магнитные, зависят от размера частиц, а именно — с уменьшением размера частиц намагнитченность насыщения уменьшается, а остаточная намагнитченность и коэрцитивная сила возрастают. Фокусировка осуществляется в ближнем поле излучения в металлизированной фотонной структуре в условиях отрицательного коэффициента преломления. Одним из наиболее эффективных способов исследования микроволновых свойств является методика магнитного резонанса. Известно, что характеристики резонансной линии, такие как значение поля резонанса, ширина и форма линии, зависят от размера наночастиц.

Для успешного применения магнитных наноконпозитов на основе опаловых матриц в управляемых магнитным полем электронных приборах СВЧ-диапазона необходимо решить несколько проблем: добиться оптимальных условий взаимодействия волн с матрицей, чтобы обеспечить наибольшую величину эффекта; выбрать схему включения элемента, содержащего полученную матрицу, в СВЧ-тракт; выбрать условия измерений таким образом, чтобы добиться управления с помощью магнитного поля как можно меньшей величины.

В настоящей работе исследованы микроволновые свойства опаловых матриц, содержащих в межферритических пустотах наночастицы Mn-Zn- и Ni-Zn-ферритов. Микроволновые свойства измерены на частотах миллиметрового диапазона, причем исполь-

зованы две схемы включения образца матрицы в СВЧ-тракт. В первом случае образец помещается в полый резонатор, и измерения проводятся на частотах, близких резонансным частотам резонатора. При таком включении достигается наибольшая величина изменений СВЧ-сигнала при выполнении условий магнитного резонанса в исследуемой матрице, однако измерения возможны только на дискретных частотах. В другой методике использовано прохождение микроволн через образец опаловой матрицы, который помещался в волновод, что позволяло непрерывно изменять частоту волны в широких пределах. Изменения микроволнового сигнала, прошедшего через нанокompозит, происходят, в основном, из-за изменения поверхностного импеданса нанокompозита в условиях магнитного резонанса и из-за поглощения электромагнитной волны в ней. Анализ результатов ведется с учетом структурного и магнитного состояния материала. Процесс эффективного взаимодействия микроволновых полей с наночастицами ферритов представляет интерес для нахождения условий существования отрицательной действительной части магнитной проницаемости.

Экспериментальные методы

Микроволновые измерения выполнены при комнатной температуре в частотном диапазоне 26—38 ГГц с использованием прямоугольных резонаторов и стандартных волноводов, работающих на моде TE_{10} . Образец размещался длинной стороной вдоль оси СВЧ-тракта в резонаторе и поперек тракта в волноводе (рис. 1, 2). В схеме, когда образец помещен в резонатор, внешнее постоянное магнитное поле H , создаваемое электромагнитом, прикладывается перпендикулярно волновому вектору волны q . Когда образец находится в волноводе, внешнее магнитное поле лежит в плоскости образца параллельно или перпендикулярно вектору микроволнового электрического поля E_{\sim} .

Относительные изменения d_m и r_m во внешнем магнитном поле соответственно модулей коэффициентов прохождения $|D(H)|$ и отражения $|R(H)|$ рассчитывались на основании экспериментально полученных значений этих коэффициентов по формулам

$$d_m = [|D(H)| - |D(0)|] / |D(0)| ;$$

$$r_m = [|R(H)| - |R(0)|] / |R(0)| .$$

Необходимость использования двух методик измерения микроволновых характеристик обусловле-

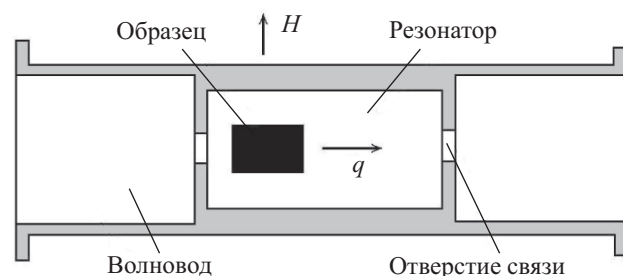


Рис. 1. Схема расположения образца в резонаторе

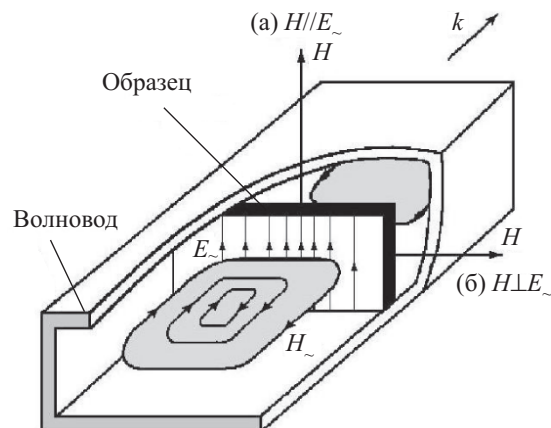


Рис. 2. Схема расположения образца в волноводе

на следующим. В резонаторе можно выполнить измерения вблизи его собственных частот, каждая из которых соответствует определенному типу электромагнитных колебаний. В условиях магнитного резонанса увеличивается поглощение электромагнитной энергии, поэтому полевая зависимость амплитуды принятого сигнала определяется резонансной зависимостью мнимой части магнитной проницаемости образца от напряженности внешнего постоянного магнитного поля. Преимуществом данной методики для определения оптимальных условий использования опаловых матриц, содержащих наночастицы ферритов со структурой типа шпинели, является то, что она позволяет достичь максимально возможных изменений микроволнового сигнала при изменении напряженности внешнего поля.

Достоинство второй методики, когда образец помещается в поперечное сечение волновода, состоит в том, что частота волны может изменяться непрерывно во всем интервале, в котором распространяется волна TE_{10} и осуществляется одномодовый режим. Для волновода сечением 7,2×3,6 мм это частоты от 26 до 38 ГГц. Два варианта расположения вектора внешнего постоянного магнитного поля (варианты (а) и (б) на рис. 2) дают возможность реализовать различную ориентацию полей и выявить разные типы резонансов.

Опаловые матрицы с наносферами SiO_2 диаметром от 200 до 300 нм были синтезированы при выполнении следующих технологических операций. Наночастицы аморфного SiO_2 получали по технологии, основанной на реакции гидролиза тетраэфира ортокремниевой кислоты ($Si(OC_2H_5)_4$) с раствором этанола (C_2H_5OH) в присутствии гидроксида аммония (NH_4OH), который служил катализатором. Во время реакции гидролиза на первой стадии образуются мелкие разветвленные наночастицы, которые в процессе поликонденсации превращаются в частицы аморфного диоксида кремния сферической формы. После отстаивания суспензии и удаления гидролизата упорядоченный осадок представляет собой гидрогель с содержанием жидкости до 50—60 вес. %, мелоподобный, легко ломающийся, что вызывает необходимость последовательно проводить различные виды термообработки с целью упрочнения

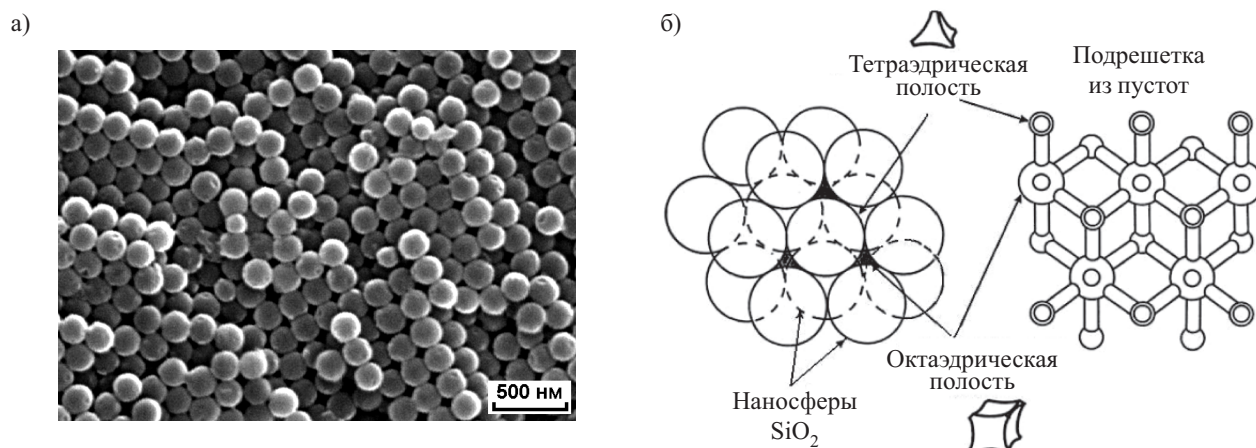


Рис. 3.

а — строение правильной упаковки наносфер SiO_2 (опаловая матрица); *б* — схема строения опаловой матрицы и подрешетки пустот в опаловой матрице

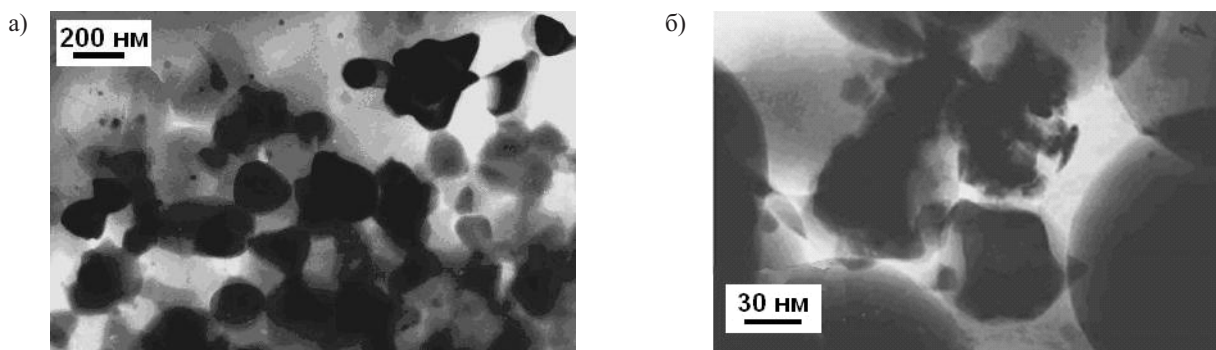
полученных опаловых матриц. Контроль правильности упаковки наносфер проводился по форме и ширине полос брегговского отражения. Строение типичного образца опаловой матрицы высокого качества (с размером наносфер SiO_2 , равным 200 нм) представлен на **рис. 3, а** (использован растровый электронный микроскоп *LEO1430*). В процессе синтеза были сформированы плотнейшие решетчатые упаковки, в которых наносферы образуют тетраэдрические и октаэдрические пустоты: каждую сферу SiO_2 диаметром ≈ 200 нм окружает по 6 октаэдрических пустот размером ≈ 80 нм и 8 тетраэдрических размером ≈ 40 нм (рис. 3, б).

Одним из наиболее простых и широко применяемых способов введения различных химических элементов (и соединений) в опаловые матрицы является метод пропитки. Метод основан на пропитке опаловой матрицы веществом определенного химического состава (прекурсором) с последующей термообработкой, в процессе которой в межсферических пустотах опаловой матрицы формируется необходимый для получения шпинелевой структуры химический состав. Прекурсоры должны обладать хорошей растворимостью в воде (или в других растворителях) и переходить в оксиды (или в другие соединения) при заданных условиях термообработки. В качестве таких веществ можно использовать растворимые соли металлов (в настоящей работе применялись нитраты $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ и

$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$). В процессе пропитки водные растворы солей самопроизвольно, за счет капиллярного эффекта, заполняют поры опаловой матрицы. Затем в процессе термообработки происходит частичное термическое разложение нитратов и удаляется несвязанная вода. Данная процедура повторяется многократно (до 10—12 раз) для постепенного заполнения межсферического пространства матрицы оксидами, что позволяет получить заданную структуру.

Структурное состояние нанокompозитов на основе матриц

Структура опаловой матрицы до введения в межсферические пустоты магнитных наночастиц представляет собой упорядоченный ансамбль наносфер, образующих плотно упакованную периодическую структуру. После процедуры заполнения электронной микроскопией было установлено, что большая часть внесенного вещества сосредоточена в пространстве между наносферами. Рентгенофазовый анализ показал, что во введенном в нанопустоты веществе есть несколько железосодержащих фаз. В частности, в нанокompозите с Ni–Zn-ферритом большинство рефлексов относятся к фазам типа ZnFe_2O_4 и $(\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x})\text{Fe}_2\text{O}_4$, имеющих кристаллическую структуру шпинели. Введенные фазы имеют поликристаллическую структуру с частицами неправильной формы размерами от 5 до 70 нм (**рис. 4**, использован просвечивающий электронный микроскоп *JEM-200CX*).

Рис. 4. Структура нанокompозита, содержащего Mn–Zn-шпинель (*а*) и Ni–Zn-шпинель (*б*)

Объемная концентрация внесенных фаз не превышает 3—5%. В дальнейшем будем называть полученный композитный материал как Ni-Zn-феррит, несмотря на возможное присутствие в нем другой магнитной фазы. Сказанное относится и к нанокompозиту с Mn-Zn-ферритом.

Магнитные свойства нанокompозитов

Магнитные свойства массивных образцов Mn-Zn- и Ni-Zn-ферритов хорошо известны [9]. Такие ферриты выпускаются серийно для целого ряда применений. Например, Mn-Zn-феррит с высокой добротностью марки SM15T имеет начальную магнитную проницаемость $\mu_0=1500$, удельный тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta/\mu_0 < 6 \cdot 10^{-4}$, который измеряется на частоте 100 кГц, максимальную магнитную индукцию $B_s=380$ мТл, коэрцитивную силу $H_c=40$ А/м. Для Ni-Zn-феррита марки L-81 магнитные характеристики дросселей имеют следующие значения: $\mu_0=350$, $\text{tg}\delta/\mu_0 < 25 \cdot 10^{-6}$ на частоте 700 кГц, $B_s=330$ мТл, $H_c=48$ А/м. Никель-цинковый феррит марки SM-2C для высокочастотных применений имеет $\mu_0=70$, $\text{tg}\delta/\mu_0 < 1 \cdot 10^{-4}$ на частоте 10 МГц, $B_s=350$ мТл, $H_c=675$ А/м. Рекомендованный диапазон частот для указанного феррита 1—20 МГц. Никель-цинковый феррит фирмы Ferroxcube марки 4B2 для высокочастотных приложений имеет $\mu_0=250$, $\text{tg}\delta/\mu_0 < 3 \cdot 10^{-4}$ на частоте 3 МГц. Однако магнитные параметры опаловых матриц, содержащих наночастицы этих ферритов, могут существенно отличаться от приведенных значений.

Можно предполагать, что нанокompозиты на основе опаловых матриц найдут применение в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн, а именно на более высоких частотах. Основной интерес вызывает область частот и магнитных полей вблизи условий магнитного резонанса для использования этого класса материалов в управляемых устройствах. Поэтому наибольший интерес представляет кривая намагничивания таких нанокompозитов, поскольку именно величина намагниченности определяет поле магнитного резонанса.

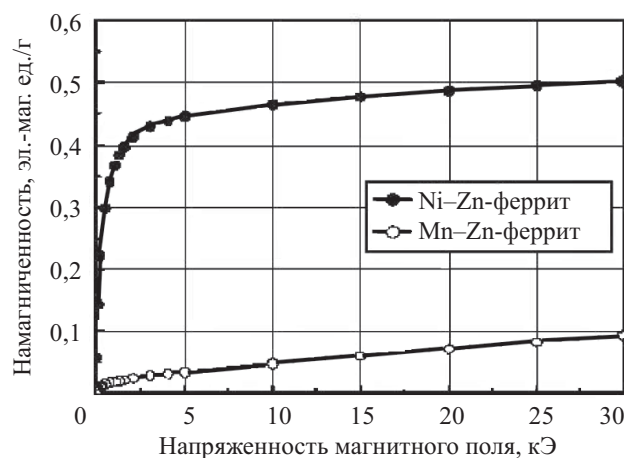


Рис. 5. Кривые намагничивания нанокompозитов, содержащих Ni-Zn- и Mn-Zn-ферриты, полученные при комнатной температуре

На рис. 5 приведены кривые намагничивания исследуемых материалов при комнатной температуре. Здесь видно, что кривые намагничивания обоих материалов, особенно Mn-Zn-феррита, не имеют полного насыщения в магнитных полях до 30 кЭ. Кроме того, кривые намагничивания имеют участок быстрого возрастания намагниченности в слабых полях. Эти особенности кривых намагничивания указывают на то, что исследуемые материалы при комнатной температуре обладают как ферромагнитным (точнее ферримагнитным) упорядочением, так и суперпарамагнитными свойствами. То, что исследуемые материалы обладают суперпарамагнитными свойствами не является удивительным, поскольку частицы внесенных фаз имеют размеры менее 70 нм, а некоторые из них и менее 10 нм.

Серия кривых намагничивания, измеренных при разной температуре на образце нанокompозита, содержащего наночастицы Mn-Zn-феррита, показана на рис. 6. Здесь видно, что при снижении температуры намагниченность нанокompозита возрастает, а ниже температуры 100 К кривые практически совпадают. Быстрый рост намагниченности в самых слабых полях указывает на присутствие ферромагнитной фазы или фаз.

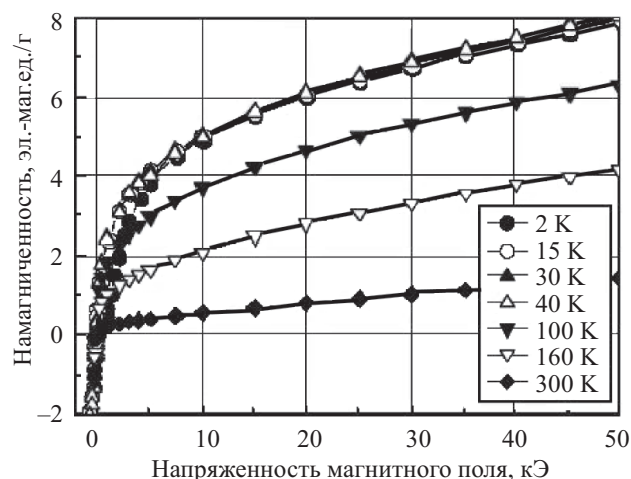


Рис. 6. Кривые намагничивания нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит, полученные при разной температуре

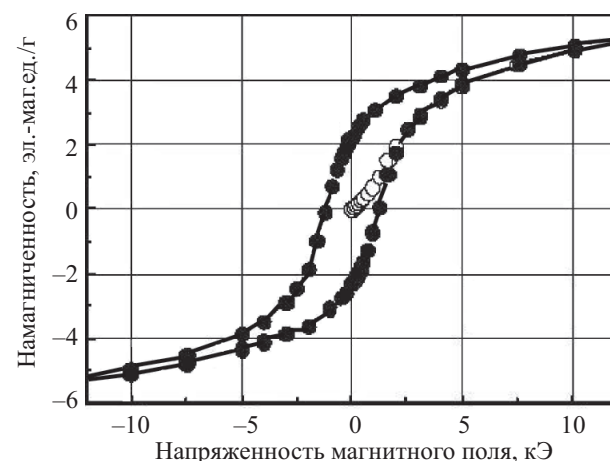


Рис. 7. Петля гистерезиса нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит, полученная при температуре 2 К

На образцах нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит, были измерены петли магнитного гистерезиса. Измерения выполнялись в интервале температуры от 2 до 300 К. Петля гистерезиса, полученная при $T=2$ К, показана на **рис. 7**. Из этого рисунка видно, что величина коэрцитивной силы H_c превышает 1 кЭ, что совершенно необычно для шпинелей. Вероятно, столь большие значения H_c обусловлены тем, что шпинель находится в нанокompозите в виде нанодисперсных частиц.

Температурная зависимость коэрцитивной силы для этого нанокompозита показана на **рис. 8**. При увеличении температуры коэрцитивная сила быстро уменьшается и при температуре выше 100 К она принимает обычные для шпинелей значения в единицы эрстед.

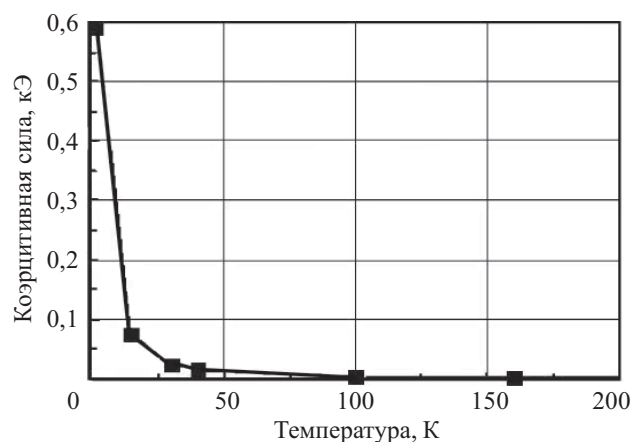


Рис. 8. Температурная зависимость коэрцитивной силы нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит

В интервале частот до 1000 Гц были исследованы действительная и мнимая компоненты магнитной восприимчивости. При измерениях амплитуда переменного магнитного поля составляла 4 Э. Наиболее интересные результаты для мнимой компоненты показаны на **рис. 9**. Как видно из рисунка, динамическая восприимчивость при криогенных температурах значительно меньше, чем при комнатной и промежуточных. Как правило, в магнитном поле в несколько килоэрстед восприимчивость меньше, чем в более слабых полях.

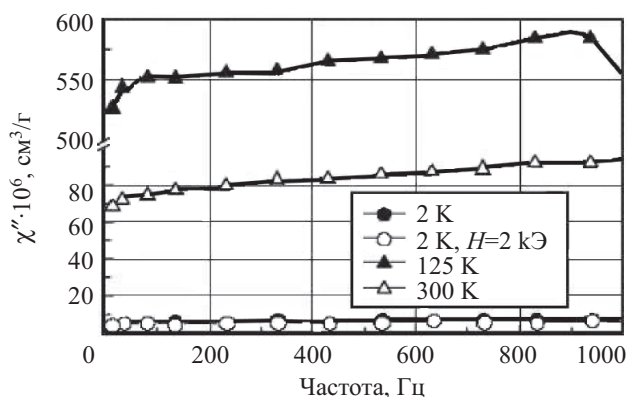


Рис. 9. Частотная зависимость мнимой части магнитной восприимчивости (χ'') нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит

Экспериментальные данные, полученные при комнатной температуре $T=300$ К и, особенно, при $T=125$ К, свидетельствуют о наличии частотной зависимости как действительной, так и мнимой частей восприимчивости. В целом, результаты, которые показаны на **рис. 9**, очевидно, не укладываются в простейшее представление о том, что магнитные фазы нанокompозита состоят из частиц ферромагнетика и суперпарамагнитных частиц [9], а поэтому требуют дальнейшего исследования. Однако для целей данной работы интерес представляет зависимость, полученная при комнатной температуре.

Микроволновые измерения в резонаторе

Как отмечалось выше, измерения в резонаторе выполняются вблизи его собственных частот. Резонатор был включен в СВЧ-тракт каскадно, как это показано на **рис. 1**. Измерения проводились с целью установить спектр магнитного резонанса в магнитных нанокompозитах, а также создать условия для достижения максимальных микроволновых изменений. Для этого в резонатор помещались образцы магнитных опаловых матриц, что существенно искажало поле в резонаторе и влияло на значения его резонансных частот, несмотря на то, что объем образцов существенно меньше объема резонатора. Были измерены частотные зависимости прошедшего сигнала как без образца, так и с образцом.

В экспериментах было использовано несколько прямоугольных резонаторов различной ширины длиной 50 мм и высотой 3,2 мм. Ширина резонатора, частотная зависимость для которого показана на **рис. 10**, составляла 5,2 мм. Максимумы амплитуды прошедшего через резонатор сигнала, приходящиеся на частоты 35,8 и 34 ГГц, соответствуют модам H_{101} и H_{100} . При помещении образца в резонатор резонансные частоты уменьшаются, ширина резонансной линии увеличивается из-за микроволновых потерь в образце. Результаты измерения полевых зависимостей микроволнового сигнала показаны на **рис. 11**. Как видно из **рис. 11, а**, в образце, содержащем Ni-Zn-феррит, изменения микроволно-

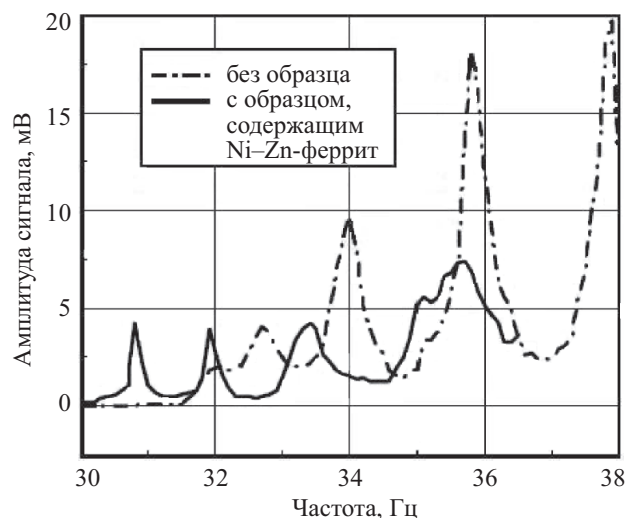


Рис. 10. Частотная зависимость амплитуды сигнала, прошедшего СВЧ-тракт с резонатором

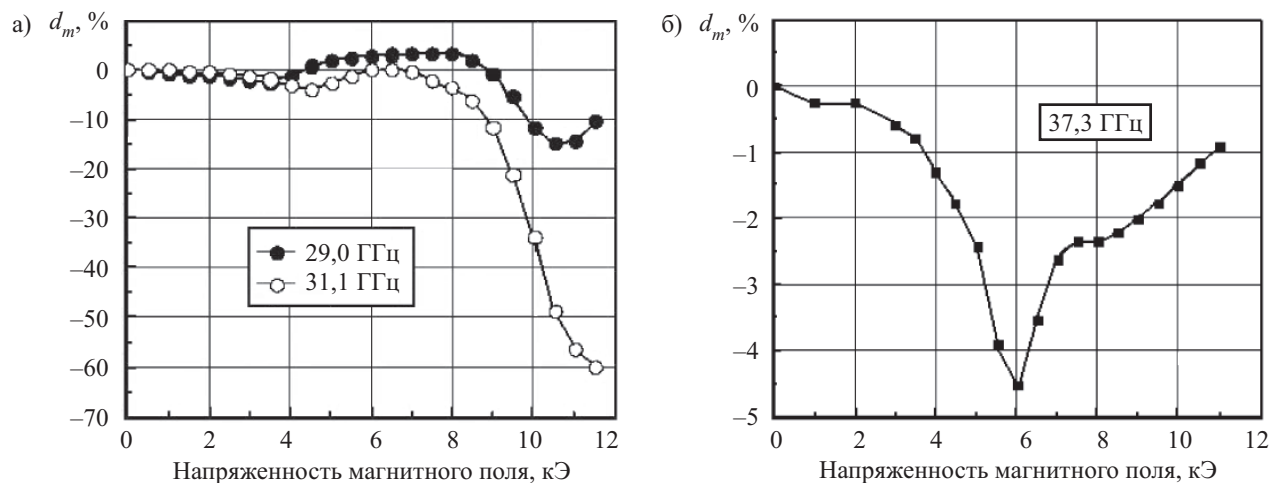


Рис. 11. Микроволновой магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей Ni-Zn- (а) и Mn-Zn- (б) ферриты

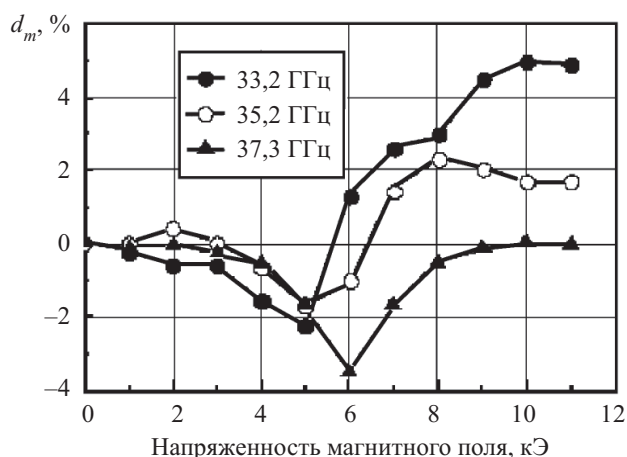


Рис. 12. Магнитный резонанс в опаловой матрице, содержащей Mn-Zn-феррит на нескольких частотах

вого сигнала превышают 60%. Подобные изменения, в принципе, могут найти применение в управляемых электронных приборах миллиметрового диапазона.

Результаты измерения полевой зависимости изменения коэффициента прохождения для нескольких частот показаны на рис. 12. По мере увеличения частоты поле резонанса увеличивается, при этом с ростом частоты увеличивается амплитуда в области резонансной особенности.

В работе [2] отмечалось, что амплитуда резонансной зависимости и форма линии магнитного резонанса для нанокompозитов изменяются, если измерения производятся несколько раз, что, в принципе, возможно за счет явления магнитной аккомодации. В данной работе было проверено существование подобного эффекта на образцах нанокompозитов, содержащих наночастицы шпинелей. Результаты двух повторных измерений полевой зависимости изменения коэффициента прохождения, представленные на рис. 13, показали, что для исследуемых нанокompозитов эффект магнитной аккомодации в магнитном резонансе отсутствует.

Микроволновые измерения в волноводе

Измерения были выполнены по схеме, показанной на рис. 2. В этой серии измерений помимо d_m

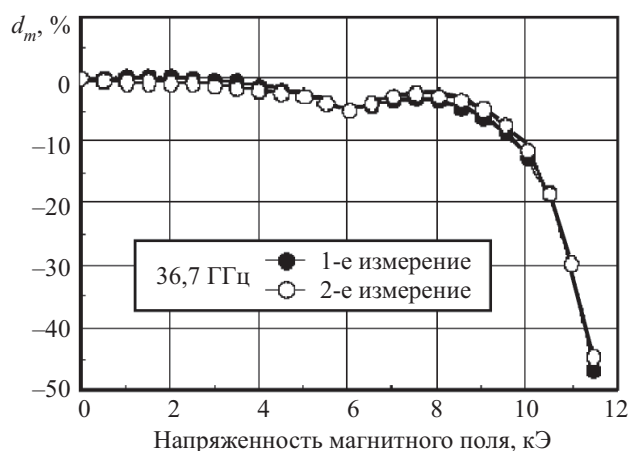


Рис. 13. Повторные измерения магнитного резонанса в опаловой матрице, содержащей Ni-Zn-феррит

определялось еще и относительное изменение r_m модуля коэффициента отражения. Полученные полевые зависимости изменений коэффициентов прохождения и отражения для нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит, при $H \perp H_0$ приведены на рис. 14.

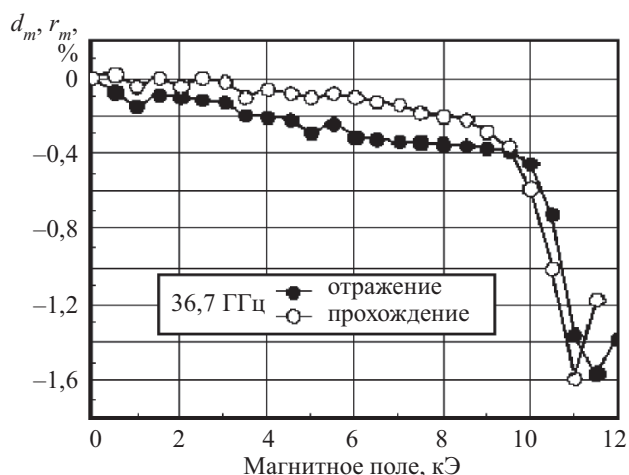


Рис. 14. Магнитный резонанс (36,7 ГГц), измеренный по отражению и прохождению микроволн через образец нанокompозита, содержащего Mn-Zn-феррит при $H \perp H_0$

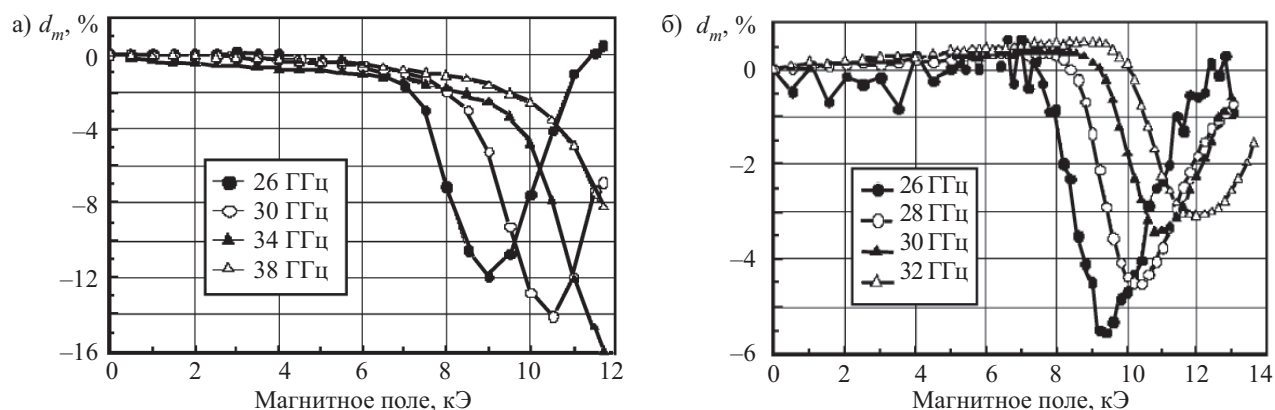


Рис. 15. Магнитный резонанс, измеренный по прохождению микроволн через образец нанокompозита, содержащего Ni-Zn-феррит при $H \perp H_0$ (a) и $H // H_0$ (б)

Здесь видно, что зависимости практически одинаковы как по величине изменений, так и по форме.

Полевые зависимости изменений прошедшего сигнала для образца, содержащего Ni-Zn-феррит, при $H \perp H_0$ показаны на рис. 15, а. По мере увеличения частоты положение резонансной особенности приходится на более сильные поля; амплитуда резонанса с ростом частоты увеличивается — см. рис. 16.

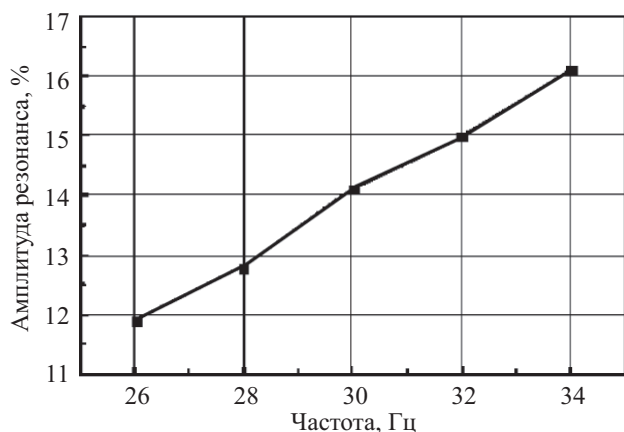


Рис. 16. Частотная зависимость амплитуды магнитного резонанса прошедшего сигнала при $H \perp H_0$ для образца нанокompозита, содержащего Ni-Zn-феррит

Несколько иная картина наблюдается при $H // H_0$. Как видно на рис. 15, б, здесь резонансная особенность коэффициента прохождения также присутствует и по мере увеличения частоты смещается в сторону сильных полей, однако при этом амплитуда резонанса уменьшается. Это объясняется следующим.

При $H // H_0$ резонанс будет существовать в том случае, если направление магнитного поля внутри частиц введенного вещества имеет компоненту, перпендикулярную H_0 . (Последнее возможно, поскольку форма частиц введенного вещества сложная, и частицы ориентированы к внешнему магнитному полю случайным образом.) По мере роста частоты резонанс приходится на более сильные поля. Одновременно, с приближением поля к состоянию технического насыщения, области неоднородного поля в частицах уменьшаются, а направление вектора внутреннего постоянного магнитного поля, в целом, приближается к направлению внешнего. Поэтому в данной конфигурации полей с ростом частоты амплитуда резонанса уменьшается.

Измерения, выполненные на образце опаловой матрицы, содержащей наночастицы Ni-Zn-феррита, на нескольких частотах при $H \perp H_0$ показали, что в данном случае с ростом частоты амплитуда резонансной особенности возрастает, как и для матрицы, содержащей Mn-Zn-феррит (рис. 17, а).

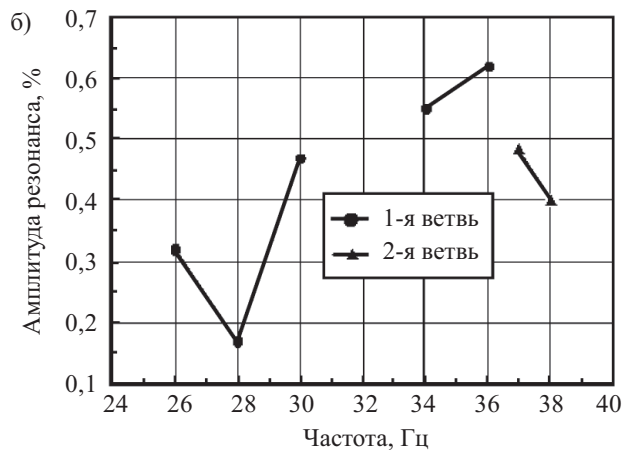
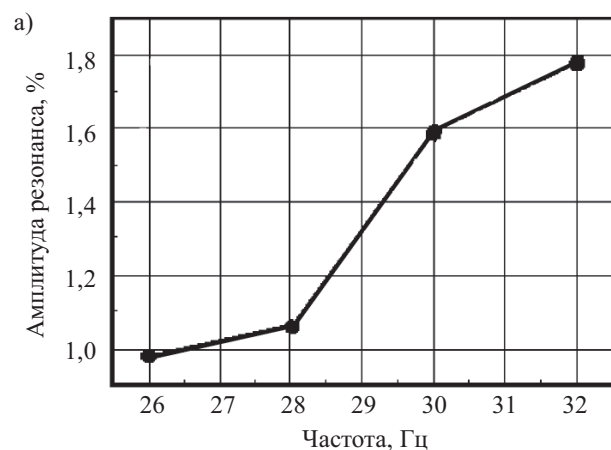


Рис. 17. Частотная зависимость амплитуды магнитного резонанса в опаловой матрице, содержащей Mn-Zn-феррит, при $H \perp H_0$ (a) и $H // H_0$ (б)

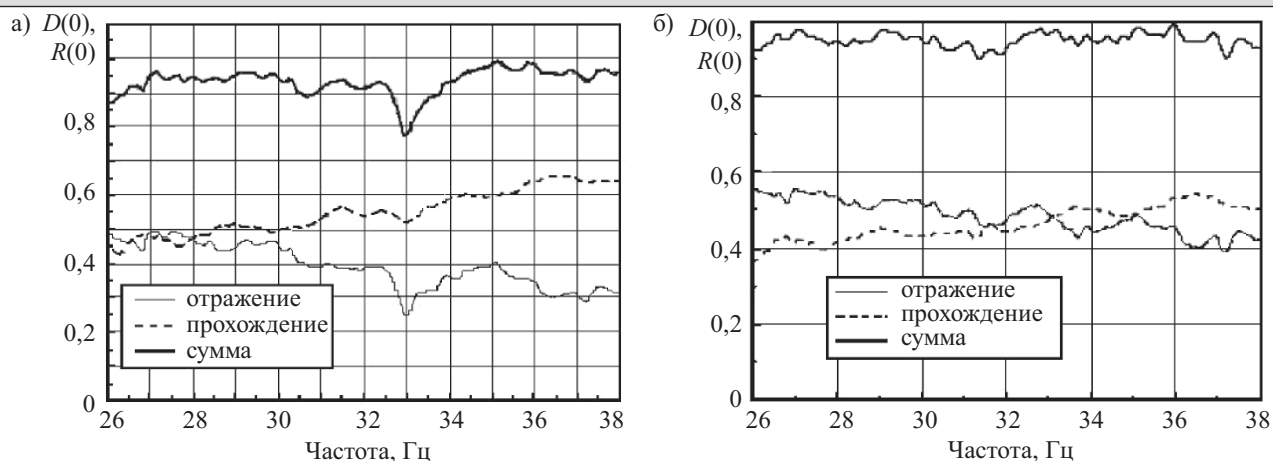


Рис. 18. Частотные зависимости коэффициентов прохождения и отражения по мощности, а также суммы этих коэффициентов для опаловой матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит

В ориентации полей $H//H_z$ частотная зависимость амплитуды резонансов для нанокompозита, содержащего частицы Mn-Zn-феррита, имеет более сложный характер, как показано на рис. 17, б. Здесь присутствуют резонансы, которые можно отнести к двум различным ветвям спектра магнитного резонанса. Для резонансов, принадлежащих 1-й ветви, с ростом частоты амплитуда резонансов в целом возрастает.

На рис. 18, а показана частотная зависимость коэффициентов прохождения $D(0)$ и отражения $R(0)$ по мощности для образца опаловой матрицы, содержащего наночастицы Ni-Zn-феррита. Данные измерения выполнены без приложения постоянного магнитного поля. В целом, в рассматриваемом частотном диапазоне коэффициент прохождения возрастает, а коэффициент отражения убывает с ростом частоты. Здесь показана также сумма коэффициентов $D(0)+R(0)$. Отличие суммы от единицы указывает на долю энергии, поглощенную в образце. На частотной зависимости суммы, а также коэффициента отражения, ясно видна особенность в области частоты 33 ГГц, где сильно уменьшается коэффициент отражения и возрастает поглощение электромагнитных волн.

Подобная зависимость для матрицы, содержащей Mn-Zn-феррит, приведена на рис. 18, б. Здесь резкие аномалии частотной зависимости коэффициентов и их суммы отсутствуют, а частотные зависимости $D(0)$ и $R(0)$ проявились значительно слабее, чем для матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит.

Следует отметить, что в рассмотренной области миллиметровых волн порядок величин коэффициентов, измеренных без внешнего магнитного поля в данной работе и полученных ранее, одинаков.

Заключение

Экспериментально продемонстрировано эффективное воздействие электромагнитных волн миллиметрового диапазона на 3D-нанокompозиты из опаловых матриц, содержащих наночастицы Ni-Zn- и Mn-Zn-ферритов. Зависимость коэффициента прохождения микроволн от напряженности магнитного поля определяется магнитным резонансом в магнит-

ных нанокompозитах. Показано, что изменения микроволнового сигнала, прошедшего резонатор с образцом матрицы, содержащей Ni-Zn-феррит, достигают 60%. Измерена частотная зависимость микроволновых изменений. Для ориентации полей $H\perp H_z$ наблюдалась обычная частотная зависимость амплитуды резонансного пика, когда амплитуда возрастает с ростом частоты. Для ориентации $H//H_z$ в матрице, содержащей Ni-Zn-феррит, наблюдалось аномальное уменьшение амплитуды резонанса с ростом частоты волны.

Измерена частотная зависимость коэффициентов прохождения и отражения для нанокompозитов в отсутствие внешнего магнитного поля. Было установлено, что в диапазоне частот от 26 до 38 ГГц коэффициент отражения, в целом, убывает, а коэффициент прохождения, в целом, возрастает при увеличении частоты волны. Частотная зависимость для нанокompозита, содержащего наночастицы Ni-Zn-феррита, выражена сильнее. Доля поглощенной в образце нанокompозита мощности без внешнего магнитного поля составляет от 5 до 20%.

Сопоставление изменений микроволнового сигнала при прохождении волной образца магнитной матрицы и при отражении от нее показало, что величина изменений и форма полевой зависимости коэффициентов прохождения и отражения близки друг к другу. Теоретический анализ изменений коэффициентов прохождения и отражения в магнитном поле показал, что изменения коэффициента прохождения и отражения выражаются сходными формулами с использованием добавки, которые получают во внешнем магнитном поле постоянная распространения в образце и его волновое сопротивление.

Установлено, что для получения наибольших изменений микроволнового сигнала следует осуществлять ориентацию полей $H\perp H_z$.

Полученные результаты создают предпосылки для разработки управляемых магнитным полем высокочастотных устройств, работа которых будет основана на использовании микроволнового магнитного резонанса в магнитных нанокompозитах на основе опаловых матриц. Такие устройства конструк-

тивно достаточно просты и могут быть эффективны в эксплуатации. Рассматриваемые материалы могут также найти применение при создании управляемых аттенуаторов, фазовращателей и других устройств миллиметрового диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Photonic glasses. Ed. Fuxi Gan, Lei Xu. Imperial College Press. 2006.
2. Самойлович М. И., Белянин А. Ф., Юрасов Н. И. и др. Металломагнитные диэлектрические нанокомпозиты на основе опаловых матриц // Мат-лы XII Междунар. науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России. (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники)".— Россия, г. Москва.— 2006.— С. 32—39.
3. Efros A., Jing Shi, Blair S. et. al. Nanoscale metallic photonic crystals: fabrication, physical properties and applications // NSF Nanoscale Science and Engineering Grantees Conference.— 2002.— P. 253—257.

4. Cole R. M., Sugawara Y., Baumberg J. J. et. al. Easily coupled whispering gallery plasmons in dielectric nanospheres embedded in gold films // Phys. Rev. Letters.— 2006.— Vol. 97.— P. 137401.

5. Астрова Е. В., Боровинская Т. Н., Толмачев В. А., Перова Т. С. Технология создания рисунка в макропористом кремнии и получение полос двумерных фотонных кристаллов с вертикальными стенками // ФТП.— 2004.— Т. 38, вып. 9.— С. 1125—1128.

6. Alves C. R., Aquino R., Depeyrot J. et. al. Superparamagnetic relaxation evidences large surface contribution for the magnetic anisotropy of MnFe₂O₄ nanoparticles of ferrofluids // J. Mater. Sci.— 2007.— Vol. 42.— P. 2297—2303.

7. Hua Su, Huaiwu Zhang, Xiaoli Tang, Yingli Liu. Effects of nanocrystalline ferrite particles on densification and magnetic properties of the NiCuZn ferrites // J. Mater. Sci.— 2007.— Vol. 42.— P. 2849—2853A.

8. Stancu A., Spinu L., O'Connor C. J. Micromagnetic analysis of the transverse susceptibility of particulate systems // J. Magn. Mater.— 2002.— Pt. 2.— P. 242—245.

9. Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш. Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике.— М.: Сов. радио, 1975.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



III Всероссийская научно-техническая конференция «ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ — 2008» МЭС-2008

6—10 октября 2008 г.

Московская обл., санаторий «Истра».

Тематика:

- ✦ Теоретические аспекты проектирования микро- и наноэлектронных систем (МЭС)
- ✦ Методы и средства автоматизации проектирования микро- и наноэлектронных схем и систем (САПР СБИС)
- ✦ Опыт разработки цифровых, аналоговых, цифро-аналоговых, радиотехнических функциональных блоков СБИС
- ✦ Системы на кристалле перспективной РЭА
- ✦ Выставка и презентация коммерческих продуктов
- ✦ Форум диссертационных работ

Организаторы:

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (ИППМ РАН)

Московский государственный институт электронной техники (технический университет) ФГУП «Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс».

Рабочий язык конференции — русский.

Контакты:

124681 Москва, ул. Советская, д. 3, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Оркомитет МЭС-2008, Борискин Вячеслав Степанович;
тел.: 8(499) 729-95-69;
факс: 8(499) 729-92-08;
E-mail: boriskin@ippm.ru

Область интересов конференции:

- ✦ Проектирование цифровых СБИС
- ✦ Проектирование аналоговых и радиотехнических функциональных блоков СБИС
- ✦ Проектирование СБИС со смешанными сигналами
- ✦ Методы структурного синтеза аналоговых, цифровых и смешанных СБИС и СФ блоков
- ✦ Системы на кристалле
- ✦ Наноразмерные схемы и системы
- ✦ Микромеханические системы
- ✦ Специализированные (стойкие к спецвоздействию, фоточувствительные и т. п.) СБИС
- ✦ Фоточувствительные СБИС
- ✦ Методы цифровой обработки информации
- ✦ Методы высокоуровневого моделирования
- ✦ Методы логического синтеза и логического моделирования в САПР СБИС
- ✦ Методы электрического моделирования в САПР СБИС
- ✦ Методы аналогового и смешанного поведенческого моделирования
- ✦ Методы моделирования радиотехнических СБИС
- ✦ Методы генерации моделей для САПР СБИС
- ✦ Методы автоматизации топологического проектирования в САПР СБИС
- ✦ Методы приборно-технологического моделирования
- ✦ Методы моделирования межсоединений
- ✦ Методы проектирования и моделирования новых приборных структур и схем наноэлектроники