

## Радиопоглощающие свойства модифицированных твердых растворов на основе феррита висмута и феррониобата свинца с различной термодинамической предысторией

П. А. Астафьев,\* К. М. Жидель, Я. А. Рейзенкинд, Л. А. Шилкина, Л. А. Резниченко  
Южный федеральный университет, Научно-исследовательский институт физики  
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194  
(Поступила в редакцию 01.06.2022; подписана в печать 20.06.2022)

В работе исследованы радиопоглощающие и резонансные свойства твердых растворов на основе  $\text{BiFeO}_3$  и  $\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ , модифицированных  $\text{GeO}_2$ . Выбор данных систем обоснован высокими радиопоглощающими свойствами компонентов по-отдельности и перспективами их применений в СВЧ-технике. Кратко описан метод исследования цилиндрических образцов материала на микрополосковой линии при помощи анализатора цепей. Измерения проводились в области частот 300 кГц–26,5 ГГц. Для измерений было подготовлено 3 серии образцов, изготовленных с использованием различных технологических режимов, по 3–5 образцов в каждой. Это было необходимо для набора статистики. Исследования показали, что с увеличением пористости материала его радиопоглощающие свойства усиливаются. Кроме того, высота цилиндрических образцов качественно не влияет на их свойства, что существенно облегчит подготовку новых образцов к исследованиям. Материалы, с высокой концентрацией феррониобата свинца имеют высокие радиопоглощающие свойства. Полученные результаты помогут в разработке материалов с управляемыми радиопоглощающими свойствами для применений в качестве радиопоглощающих покрытий, СВЧ-подложек, материалов резонаторов и фильтров.

PACS: 77.22.-d

УДК: 538.95

Ключевые слова: СВЧ-поглощение, феррониобат свинца, феррит висмута, мультферроик.

### ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективные радиопоглощающие материалы (РПМ) позволяют решать ряд проблем, связанных с экологической защитой биологических объектов от вредного воздействия электромагнитного излучения, подавлением помех средствам связи, обеспечением электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, предотвращением утечек информации по радиоканалу и т.п. Отдельный интерес представляет разработка технологии снижения радиолокационной заметности.

Как правило, материалы, поглощающие микроволновое излучение, состоят из матрицы и проводящих/диэлектрических/магнитных наполнителей. Среди наполнителей, которые могли бы обеспечить приемлемый уровень эксплуатационных характеристик в широком частотном диапазоне, можно выделить ферриты. В отличие от других РПМ, ферритовые материалы могут демонстрировать высокие показатели в диапазоне длин волн от десятков МГц до десятка ГГц. Например, в обзорной работе [1] выделяют 5 типов поглощающих материалов (все имеют в своей основе магнитную подсистему):

1. ферриты;
2. материалы на основе порошка металлов с ферромагнитными свойствами;

3. материалы на основе наноразмерных композитов с ферритами;
4. волоконные магнитные материалы;
5. материалы на основе карбонильного железа.

Во многих работах сообщается, что магнитная проницаемость является одним из главных факторов, определяющих радиопоглощающие свойства материала. Магнитное насыщение, магнитно-кристаллическая анизотропия и внутренняя деформация — основные параметры, влияющие на магнитную проницаемость.

Волоконным материалам уделяется особое внимание при поиске высоких показателей поглощения. Так, например, в обзорной работе [2] отмечаются относительно высокие показатели поглощения у карбидных, нитридных, оксидных, многокомпонентных нановолокон. Также отдельно отмечаются радиопоглощающие свойства углеродных нанотрубок и проводящих полимерных волокон.

Традиционные материалы, такие как ферриты, материалы на основе углеродных нанотрубок и углеродные волокна демонстрируют удовлетворительные характеристики подавления микроволн в условиях комнатной температуры. Однако они не подходят для высокотемпературных применений, что объясняется их плохой стойкостью к окислению или низкой температурой Кюри.

В последнее время все больше внимания уделяется исследованию перспектив применения функциональных материалов, таких как сегнетоэлектрики, ферромагнетики и мультферроики в области СВЧ-электроники, в частности в качестве радиопоглощающих материалов.

\* al.6.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru

Проводится множество исследований электрических и магнитных свойств керамики на основе  $\text{BiFeO}_3$  в СВЧ-диапазоне. В качестве легирующих компонентов можно использовать редкоземельные элементы, например самарий [3], для улучшения магнитных свойств феррита висмута. В других работах, например [4] исследуются свойства феррита висмута, модифицированного хромом и неодимом, который демонстрирует высокий уровень радиопоглощения в области частот 10–10.5 ГГц. Кроме того, много внимания уделяется композитам на основе феррита висмута [5].

Наряду с  $\text{BiFeO}_3$ , перспективным материалом для применения в СВЧ-электронике является  $\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  [6]. В работе [7] продемонстрированы удовлетворительные радиопоглощающие свойства данного материала, а в работах [8, 9] исследуются свойства твердых растворов (ТР)  $\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  с  $\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$  и  $\text{CuMnFeO}_4$ , где также рассматриваются перспективы применения данного состава в качестве РПМ.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод, что существует два подхода в улучшении поглощающих свойств материала, связанные с усложнением его микроструктуры:

1. создание композитов на основе данного материала;
2. модификация состава легирующими компонентами, или другими составами схожей структуры.

Для того чтобы достичь высоких показателей поглощения мы выбрали второй подход. Таким образом, в данной работе исследуются радиопоглощающие свойства твердых растворов  $\text{BiFeO}_3 - \text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$ . Помимо радиопоглощающих свойств мы также уделили внимание резонансным свойствам образцов исследуемых нами материалов.

## 1. ОБЪЕКТЫ

Объектами исследования послужили образцы ТР двойной системы  $0.05\text{BiFeO}_3 - 0.95\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  (BFO–PFN). В качестве модификатора был выбран  $\text{GeO}_2$ , который был добавлен в процентном соотношении 0.5% от общей массы для того, чтобы получить более совершенную кристаллическую и зеренную структуру. Ранее этим же способом были изготовлены образцы материала ТР тройной системы  $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  (PZT–PMN) [10], при этом, помимо улучшения структуры, была также достигнута более высокая температурная стабильность некоторых характеристик состава.

Материал изготавливался в форме цилиндрических столбиков диаметром 12 мм по обычной керамической технологии [11]. При синтезе и спекании образцов были использованы различные технологические режимы,

при этом для каждого состава варьировались как температуры синтеза и спекания, так и количество этапов синтеза. В дальнейшем мы будем использовать условные сокращения, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические режимы изготовления ТР

Технологический режим	$T_{sin,1}^*$ , °C	$T_{sin,2}^*$ , °C	$T_{sint}^*$ , °C
Режим 1	800	850	1000
Режим 2	850	-	1000
Режим 3	800	850	950

$T_{sin,1}^*$  — температура первого этапа синтеза,  
 $T_{sin,2}^*$  — температура второго этапа синтеза,  
 $T_{sint}^*$  — температура спекания

Для проведения радиофизических исследований были изготовлены образцы цилиндрической формы различной высоты и диаметром 12 мм. Вариация высоты позволила оценить степень влияния данного параметра на получаемые результаты. Для каждого технологического режима была изготовлена группа образцов (от 3 до 6) в целях набора статистики. При изготовлении образцов было выдвинуто предположение о возникновении градиента структурных неоднородностей материала в связи с возможной сегрегацией свинца [12]. При этом ранее мы уже демонстрировали зависимость радиопоглощающих свойств материала в СВЧ-диапазоне от фазового состава материала [13]. В связи с этим было решено исследовать несколько образцов из каждой группы: срезы верхней, средней и нижней части столбика.

## 2. МЕТОДЫ

В рамках описаний радиофизических исследований будут упоминаться элементы матрицы рассеяния ( $S$ -параметры), поэтому необходимо кратко пояснить их сущность. Матрица  $S$ -параметров для четырехполюсника (двухпортовое устройство) состоит из 4 коэффициентов отношения мощностей электромагнитных волн:  $S_{11}$  и  $S_{22}$  — коэффициенты отражения для первого и второго портов (отношение мощности отраженной волны к падающей);  $S_{12}$  и  $S_{21}$  — коэффициенты передачи для первого и второго портов (отношение мощности прошедшей волны к мощности падающей) [14].

Радиофизические измерения выполнялись с помощью векторного анализатора цепей (VNA) P9375A «Keysight», имеющего рабочий диапазон частот 300 кГц–26.5 ГГц. Для соединения измерительной ячейки с измерительными кабелями VNA использовались СВЧ-переходы стандарта PC 3.5 с предельной рабочей частотой 26.5 ГГц.

Для исследований радиопоглощающих свойств материала использовалась измерительная ячейка, представ-

ляющая собой прямолинейный отрезок микрополосковой линии (МПЛ) на подложке из эпоксидного материала, армированного стекловолокном (FR4), с коаксиальными разъемами стандарта SMA 3.5 с обоих концов. Рабочий диапазон частот разъемов до 18 ГГц. При измерениях образцы располагались в центре ячейки, на поверхности МПЛ, при этом снимались зависимости коэффициентов матрицы рассеяния от частоты.

Качество контакта коаксиальных соединителей МПЛ и СВЧ-кабелей VNA, а также качество изготовления измерительной ячейки можно оценить путем анализа зависимостей  $S$ -параметров от частоты пустой измерительной ячейки (рис. 1).

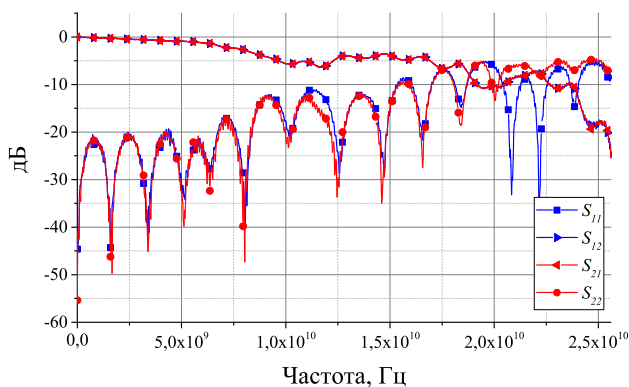


Рис. 1.  $S$ -параметры пустой МПЛ

Периодические провалы и мелкие пульсации коэффициента отражения связаны с интерференцией отраженных от коаксиальных разъемов МПЛ волн и интерференцией малых отражений от мест соединений коаксиальных переходов с измерительными кабелями и разъемами измерительной ячейки соответственно. Ширина полосы частот с удовлетворительной степенью согласования (уровень коэффициентов отражения не превышает  $-20$  Дб) составляет около 7 ГГц, поэтому достоверность измерения уровня коэффициентов отражения и передачи ограничивается сверху частотой 7–8 ГГц. Несмотря на то, что информация об уровне сигнала может быть неточной, измерения и расчеты все равно проводятся во всем доступном диапазоне частот для того, чтобы оценить радиопоглощающие и резонансные свойства на качественном уровне.

Коэффициент поглощения материала рассчитывается по формуле:

$$D_i = d_i - d_0, \quad (1)$$

где  $d_i$  — коэффициент рассеяния МПЛ с  $i$ -ым образцом,  $d_0$  — коэффициент рассеяния пустой МПЛ. Коэффициент рассеяния, в свою очередь, рассчитывается по следующей формуле:

$$d - 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2. \quad (2)$$

Коэффициент поглощения в нашем случае говорит о том, какая часть энергии рассеялась при внесении

образца в измерительную ячейку. Она состоит из трех основных вкладов:

1. энергии, поглощенной образцом;
2. энергии, отраженной в окружающее пространство за счет наличия образца;
3. энергии, поглощенной подложкой МПЛ.

Третий вклад может возникнуть из-за того, что электромагнитная волна, отраженная образцом, может устремиться в подложку МПЛ.

При анализе зависимостей  $S$ -параметров от частоты мы обращаем внимание на коэффициент передачи, пытаясь при этом обнаружить резонансные провалы. Их наличие само по себе не дает много полезной информации, однако, если мы имеем два образца одинаковой формы, но различного состава, в которых наблюдаются резонансные провалы, мы можем сравнить некоторые параметры образцов и материалов. В частности, это позволяет сравнить среднее значение диэлектрической проницаемости по положению провала в частотной области (при уменьшении диэлектрической проницаемости минимумы смещаются в область более высоких частот).

Методика же расчета коэффициента поглощения позволяет проводить сравнение уровня поглощения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в различных материалах с близкими электрическими параметрами. Подробно методика измерения и расчета коэффициента поглощения описана в работах [13, 15]. В частности, анализ зависимостей коэффициента поглощения от частоты позволяет оценить ширину полосы поглощения данной системы, при этом сравнивая результаты измерения различных материалов, можно сказать какой состав вносит большие потери в систему.

Известно, что структурные неоднородности в композиционных материалах, а также в пористых керамиках могут служить одним из основных факторов, влияющих на свойства материалов в СВЧ-диапазоне [16]. Поэтому было проведено исследование степени пористости образцов.

Для определения степени пористости образцов вначале измерялась плотность образцов методом гидростатического взвешивания в октане, затем проводилось исследование кристаллической структуры объектов рентгеновским методом порошковой дифракции. По данным рентгеновского анализа вычислялась рентгеновская плотность материала, после чего вычислялась относительная плотность. Этот параметр вычисляется как отношение измеренной плотности к рентгеновской, и показывает, насколько реальная плотность материала отличается от ожидаемой плотности бездефектного монокристалла из данного материала с учетом измеренных параметров кристаллической решетки.

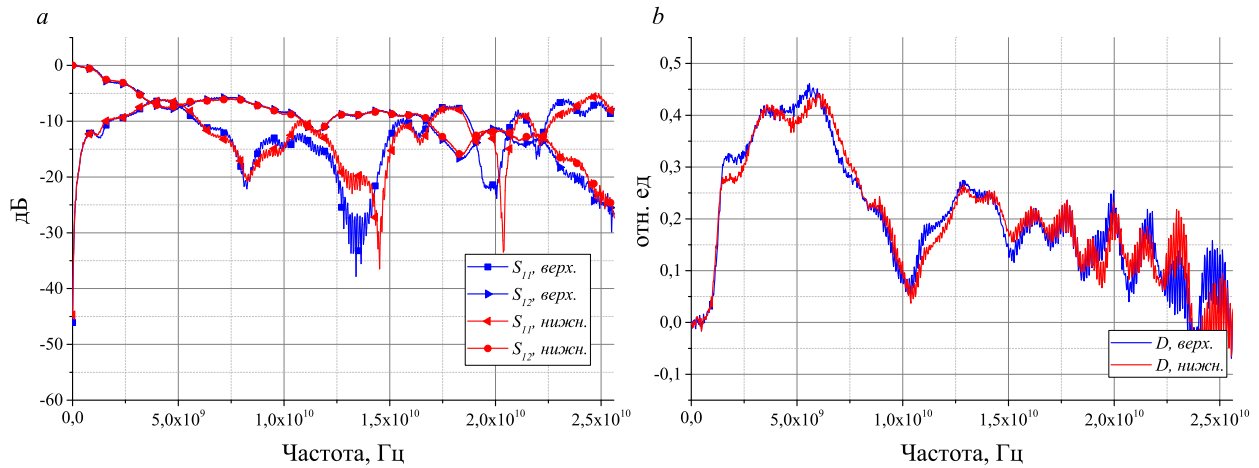


Рис. 2.  $S$ -параметры (а) и коэффициенты поглощения (б) образцов верхней (верх.), и нижней (нижн.) части столбика ТР, изготовленного с использованием режима 1

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Так как при изготовлении образцов ТР были использованы различные технологические режимы, мы проанализировали результаты измерений коэффициентов поглощения и относительной плотности и сопоставили их в целях обнаружения корреляций.

Имеет смысл дополнительно провести оценку степени однородности синтезированных составов. Неоднородность могла возникнуть на этапе синтеза и спекания цилиндрических столбиков. Так как образцы были изготовлены путем резки цилиндрических столбиков, можно оценить степень однородности материала после спекания путем сравнения характеристик образцов верхней и нижней части столбика.

Образцы исследуемого состава не проявляют резонансного поведения в исследуемом диапазоне частот (на зависимостях  $S$ -параметров от частоты отсутствуют резонансные провалы (рис. 2, а)).

Все особенности спектра  $S$ -параметров, которые мы когда-либо обнаруживали при исследовании различных материалов данным методом, мы подробно описывали ранее, в работе [13]. Отметим лишь, что спектры диагональных ( $S_{11}$  и  $S_{22}$ ) и недиагональных ( $S_{12}$  и  $S_{21}$ ) элементов матрицы рассеяния во всех наших измерениях совпали. Это говорит о том, что исследуемая система является симметричным четырехполюсником. В связи с этим мы не стали демонстрировать коэффициенты отражения и передачи электромагнитной волны, излученной со второго порта VNA.

Несмотря на небольшие различия в относительных плотностях и высотах образцов, частотные зависимости  $S$ -параметров и коэффициента поглощения неплохо согласуются друг с другом (рис. 2). Возможно, различная высота образцов компенсирует разницу в относительной плотности (табл. 2).

Характеристики образцов ТР, изготовленного с использованием технологического режима 2, также, как

Таблица 2. Относительные плотности, отклонения от средней относительной плотности и высоты образцов ТР, изготовленного по технологическому режиму 1

образец	$\rho_{rel.}, \%$	$\Delta\rho_{rel.}, \%$	$h, \text{ мм}$
верх.	93.84	0.23	1.04
нижн.	93.37	0.23	1.22

и в предыдущей группе, практически не отличаются друг от друга (рис. 3).

Относительные плотности данных образцов очень схожи друг с другом, однако высота варьируется в достаточно широком диапазоне (табл. 3). Как видно из спектров коэффициентов отражения и передачи, высота образцов влияет на их характеристики несущественно.

Таблица 3. Относительные плотности, отклонения от средней относительной плотности и высоты образцов ТР, изготовленного по технологическому режиму 2

образец	$\rho_{rel.}, \%$	$\Delta\rho_{rel.}, \%$	$h, \text{ мм}$
верх.	92.25	0.03	1.12
цент. 1	92.15	0.07	1.34
цент. 2	92.13	0.09	0.78
нижн.	92.23	0.01	0.76

Образцы ТР, изготовленные с использованием технологического режима 3 относительно неплохо согласованы как по плотности, так и по высоте (табл. 4). Их характеристики также различаются в малой степени (рис. 4).

Как было видно ранее, ТР, изготовленные по различным технологическим режимам, имеют различные относительные плотности: образцы прошедшие 2 эта-

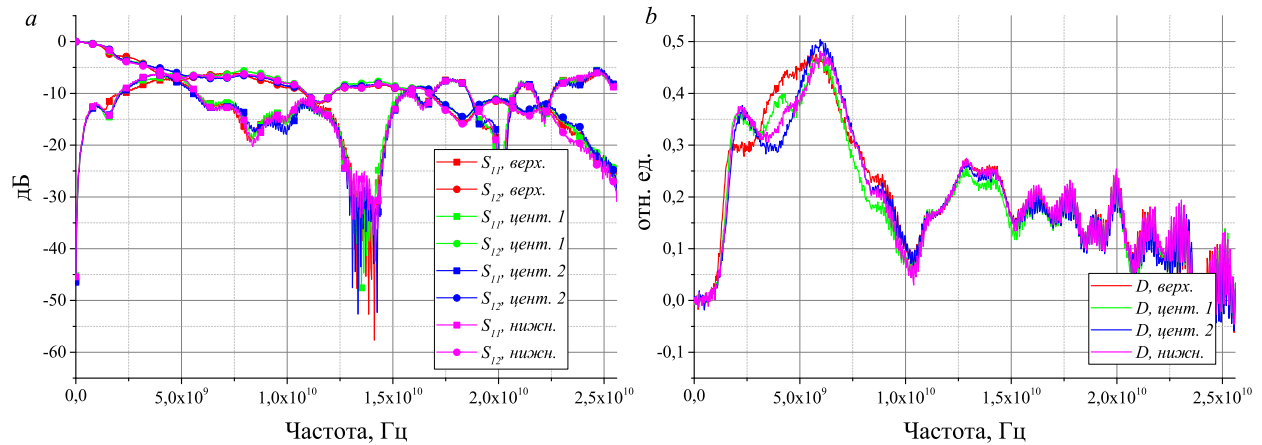


Рис. 3.  $S$ -параметры (а) и коэффициенты поглощения (б) образцов верхней (верх.), центральной (цент.) и нижней (нижн.) части столбика ТР, изготовленного с использованием режима 2

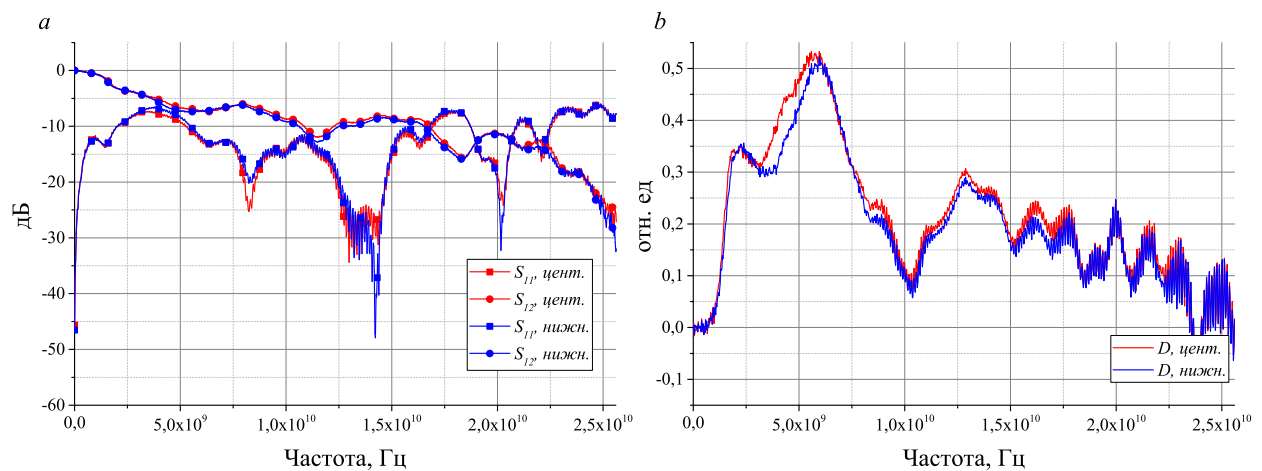


Рис. 4.  $S$ -параметры (а) и коэффициенты поглощения (б) образцов центральной (цент.) и нижней (нижн.) части столбика ТР, изготовленного с использованием режима 3

Таблица 4. Относительные плотности, отклонения от средней относительной плотности и высоты образцов ТР, изготовленного по технологическому режиму 3

образец	$\rho_{rel}, \%$	$\Delta\rho_{rel}, \%$	$h, \text{мм}$
цент.	86.99	0.11	1.48
нижн.	86.76	0.11	1.34

па синтеза и 1 этап спекания при высокой температуре (1000°С) в среднем имеют относительную плотность 93.5%; исключение одного этапа синтеза уменьшило среднюю относительную плотность до 92.2%; снижение температуры спекания до 950°С при наличии дополнительного этапа синтеза также снизило относительную плотность до 86.8%. На рис. 5 представлены поглощающие свойства вышеуказанных ТР в сравнении друг с другом.

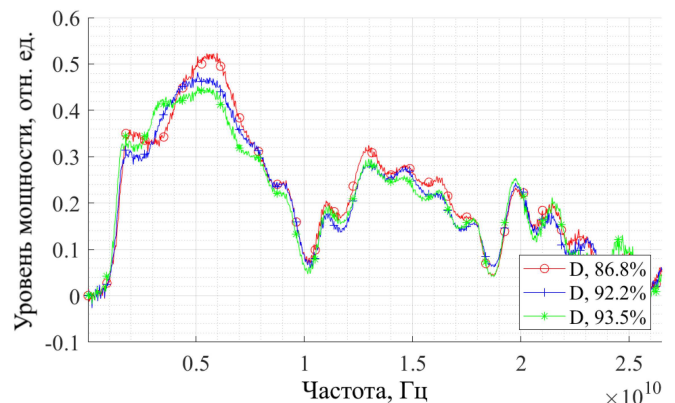


Рис. 5. Коэффициент поглощения образцов ТР с различными относительными плотностями

Из рис. 5 видно, что увеличение относительной плотности немного снижает общий уровень коэффициента поглощения. Это может быть связано со снижением общего числа структурных неоднородностей, присутствующих в материале. Одновременно с этим, все образцы имели различную высоту, однако исследование показывает, что в большинстве случаев высота образцов оказывает незначительное влияние на их свойства.

В качестве дополнения к настоящему исследованию мы провели сравнения характеристик изготовленных материалов с характеристиками материалов совершенно иной структуры и химического состава. Это позволило сформировать представление о свойствах полученных материалов на качественном уровне. Сравнение их поглощающих характеристик с материалами промышленных поглотителей различного состава представлено на рис. 6.

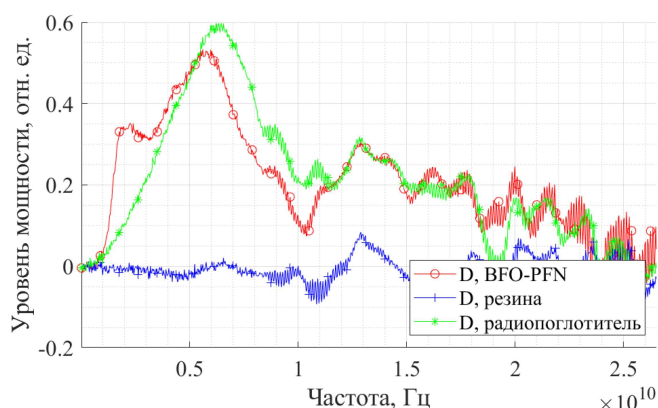


Рис. 6. Коэффициент поглощения образцов различных материалов

Для сравнения были изготовлены образцы той же формы, что и исследуемые образцы, из резины и промышленного поглотителя, в составе которого эпоксидная смола и более 50% карбонильного железа.

Образцы TP BFO–PFN обладают относительно высоким уровнем поглощения (более 50%) в области частот 5.5–6 ГГц, в то время как полоса поглощения про-

мышленного поглотителя в данной конфигурации расположена в диапазоне 5.5–7.5 ГГц. Образец из резины практически не вносит никаких потерь в систему. На некоторых частотах ее коэффициент поглощения отрицательный. Это означает, что согласование системы на данных частотах улучшилось после внесения резинового образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Набранная статистика по измерениям показывает, что если образцы не отличаются по диаметру и составу, то их высота не оказывает существенного влияния на радиопоглощающие свойства. Это сокращает время подготовки образцов к измерениям, а значит ускоряет исследование.

Анализ зависимостей  $S$ -параметров и коэффициента отражения от частоты для материалов одинакового состава, но различной относительной плотности показал, что одним из факторов, существенно влияющих на характеристики мультиферроидной керамики в СВЧ диапазоне, является степень пористости. Статистики, полученной в ходе исследования, недостаточно, чтобы судить о том, как влияет относительная плотность на резонансные свойства цилиндрических образцов.

Сравнение образцов исследуемого состава с некоторыми материалами радиоэлектронной промышленности показали TP составов  $0.05\text{BiFeO}_3-0.95\text{PbFe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_3$  имеют удовлетворительные поглощающие свойства, поэтому имеются перспективы их применения в качестве радиопоглощающих покрытий.

Так или иначе, для более точных оценок применимости данных составов в области радиоэлектроники требуется определить их спектры комплексных диэлектрических и магнитных проницаемостей, что в рамках данной системы возможно только с использованием моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности научный проект № (0852-2020-0032)/(БА30110/20-3-07ИФ)).

[1] Wei H., Zhang Z., Hussain G., Zhou L., Li Q., Ostrikov K.K. // Appl. Mat. Today. 2020. **19**. P. 100596.  
[2] Huang W. et al. // Ceramics International. 2020. **46**, N 17. P. 26441.  
[3] Palaimiene E., Macutkevicius J., Karpinsky D.V., Kholkin A.L., Banys J. // Appl. Phys. Lett. 2015. **106**, N 1. P. 012906.  
[4] Yousaf M. et al. // Journal of Colloid and Interface Science. 2022. **608**. P. 1868.  
[5] Rusly S.N.A. et al. // Ceramics International. 2020. **46**, N 1. P. 737.  
[6] Alvarez G., Font R., Portelles J., Zamorano R.,

Valenzuela R. // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2007. **68**, N 7. P. 1436.  
[7] Khuchua N.P. // Proceedings of the International Meeting on Ferroelectrics. 1966. **2**. P. 161.  
[8] Shevchuk Y.A., Gagulin V.V., Korchagina S.K., Ivanova V.V. // Inorganic materials. 2001. **37**, N 8. P. 836.  
[9] Fedii A.A., Kalganov D.A., Filonenko E.M., Yaroshenko F.A., Bezborodova P.A., Lupitskaya Y.A. // Physics of the Solid State. 2021. **63**, N 11. P. 1774.  
[10] Reznitchenko L.A. et al. // Inorganic Materials. 2009. **45**, N 2. P. 173.

- [11] *Okazaki K.* Ceramic engineering for dielectrics Zinatne. Токуо., 1969.
- [12] *Шым В.Н.* // Полупроводники-сегнетоэлектрики. Вып. 6. Материалы 7-го Международного семинара по физике сегнетоэлектриков-полупроводников. 24-27 сентября 1996. 1996. С. 199.
- [13] *Astafev P., Pavelko A., Lerer A., Reizenkind J., Noykin Y., Reznichenko L.* // Crystals. 2022. **12**. N 4. P. 551.
- [14] *Robert E.C.* Foundations for Microwave Engineering, 2nd ed. Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2001.
- [15] *Reizenkind Y.A., Kleshchenkov A.B., Lerer A.M., Noykin Y.M.* // Proceedings of the International Symposium: Physics of Lead-Free Piezoactive and Related Materials. Modeling of Eco-Systems (Analysis of Current State and Prospects of Development), Rostov-on-Don, Russia, 27–28 December 2021. 2021. **2**. P. 280.
- [16] *McNeal M.P., Jang S.J., Newnham R.E.* // J. of Appl. Phys. 1998. **83**. N 6. P. 3288.

---

## Microwave absorbing properties of modified solid solutions based on bismuth ferrite and lead ferroniobate with different thermodynamic background

**P.A. Astafev<sup>a</sup>, K.M. Zhidel, J.A. Reizenkind, L.A. Shilkina, L.A. Reznichenko**

*Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>l.6.e.9.w.4.a.9.p@yandex.ru*

In this work, the microwave absorbing and resonance properties of solid solutions based on  $\text{BiFeO}_3$  and  $\text{Pb}(\text{Fe}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})\text{O}_3$  modified with  $\text{GeO}_2$  have been studied. The choice of these systems is justified by the high microwave absorbing properties of the components separately and the prospects of their applications in microwave technology. A method for studying cylindrical material samples on a microstrip line using a network analyzer is briefly described. The measurements were carried out in the frequency range of 300 kHz–26.5 GHz. For measurements, 3 series of samples were prepared using different process conditions, 3–5 samples in each. This was necessary for collecting statistics. Studies have shown that with an increase in the porosity of the material, its radio-absorbing properties increase. In addition, the height of cylindrical samples does not qualitatively affect their properties, which will greatly facilitate the preparation of new samples for research. Materials with a high concentration of lead ferroniobate have high radio absorbing properties. The results obtained will help in the development of materials with controlled microwave absorbing properties for applications as microwave absorbing coatings, microwave substrates, resonator and filter materials.

PACS: 77.22.-d.

*Keywords:* microwave-absorption, lead ferroniobate, bismuth ferrite, multiferroic.

*Received 01 June 2022.*

### Сведения об авторах

1. Астафьев Павел Андреевич — аспирант, науч. сотрудник; e-mail: [astafev@sfedu.ru](mailto:astafev@sfedu.ru).
2. Жидель Карина Михайловна — аспирант, науч. сотрудник; e-mail: [zhidel@sfedu.ru](mailto:zhidel@sfedu.ru).
3. Рейзенкинд Яков Аронович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [jar@sfedu.ru](mailto:jar@sfedu.ru).
4. Шилкина Лидия Александровна — науч. сотрудник; e-mail: [lashilkina@sfedu.ru](mailto:lashilkina@sfedu.ru).
5. Резниченко Лариса Андреевна — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; e-mail: [lareznichenko@sfedu.ru](mailto:lareznichenko@sfedu.ru).