

**Лаборатория №5 - электрофизики композиционных материалов**  
**Заведующий лабораторией к.ф.м.н. Розанов Константин Николаевич**



### **Задачи**

Проведение исследований электрофизических, радиофизических, магнитных и других свойств однородных и неоднородных сред с целью создания новых материалов для применения в СВЧ диапазоне частот, в том числе:

- разработка и оптимизация методов измерения диэлектрической и магнитной проницаемости различных материалов в диапазоне частот 300 кГц–20 ГГц;
- экспериментальное исследование естественного ферромагнитного резонанса в тонких неоднородных ферромагнитных пленках;
- экспериментальное исследование эффективных СВЧ свойств композитных материалов;
- проведение численных исследований электродинамических свойств неоднородных структур;
- исследование физических ограничений на динамические свойства материалов и структур.

### **Экспериментальное оборудование и методы исследований**

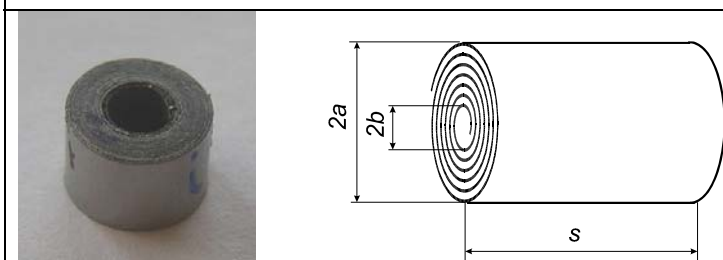
***1. Стенд для измерения комплексных значений эффективных диэлектрической и магнитной проницаемости материалов в частотном диапазоне 0,05–18 ГГц, на базе векторных анализаторов цепей HP 8720, HP 8753 и Wiltron 37247A, а также коаксиальные и полосковые измерительные ячейки. Все измерения могут быть выполнены во внешнем постоянном магнитном поле напряженностью до 7 кЭ.***

#### **Возможно измерение образцов:**

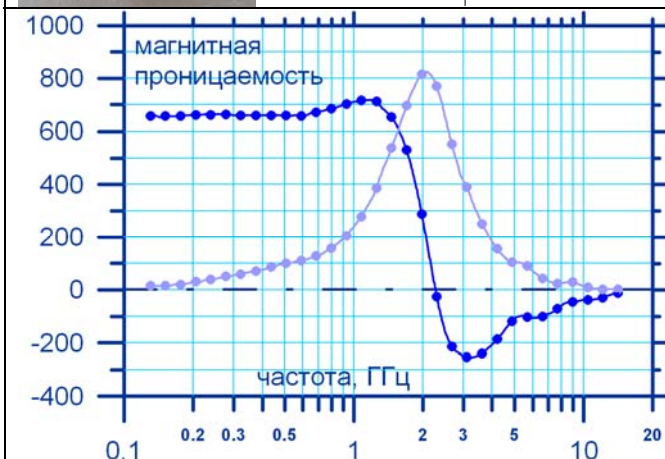
- ***Композитные материалы, вырезанные в форме шайбы (внешний диаметр 7 мм, внутренний диаметр 3 мм, толщина до 5 мм;***
- ***Тонкие магнитные пленки на жесткой подложке (предпочтительный размер образца 5мм x40мм, полная толщина образца не более 2 мм;***
- ***Тонкие магнитные пленки на гибкой подложке.***



*Векторный анализатор цепей  
Wiltron 37247A*



*Тонкая ферромагнитная пленка на гибкой полимерной подложке, свернутая в образец для измерения магнитной проницаемости в коаксиальной ячейке*

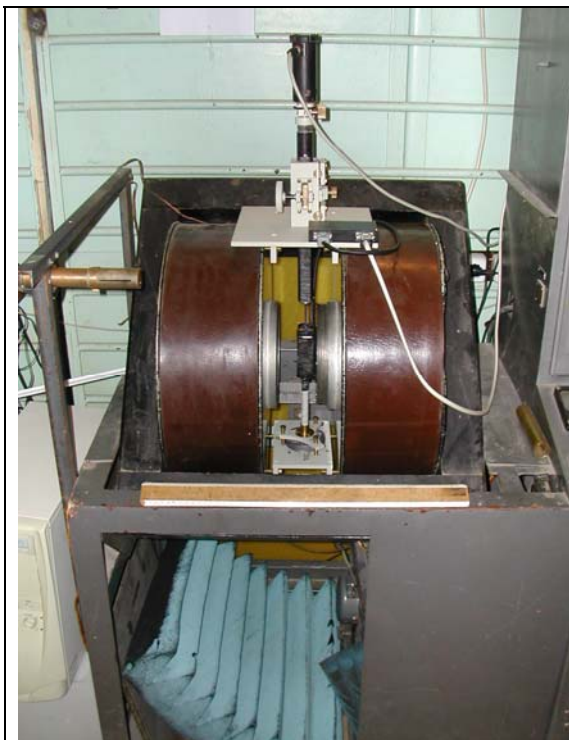


*Измеренная частотная зависимость магнитной проницаемости пленки пермаллоя.*

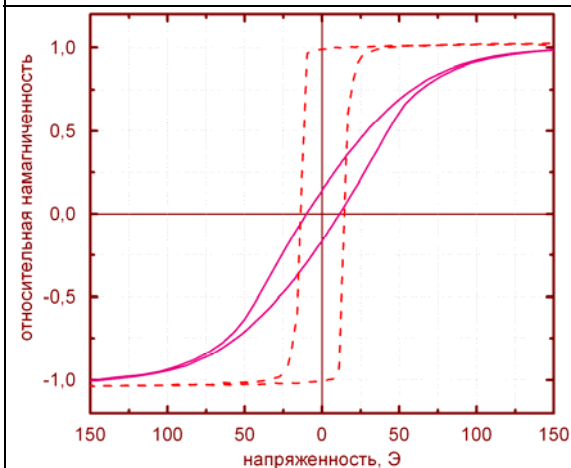


*Полосковые измерительные ячейки для измерения магнитной проницаемости тонких ферромагнитных пленок*

**2. Вибрационный магнитометр ВМ2-К для измерения магнитоэлектрических параметров композитных материалов и тонких магнитных пленок. Диапазон значений магнитного поля –  $\pm 9$  кЭ. Возможно измерение кривой гистерезиса, кривой начального намагничивания, определение направления оси магнитной анизотропии в плоскости образца, измерение компоненты магнитного момента образца, перпендикулярной внешнему полю. Измеряемый образец должен иметь форму диска диаметром от 3 до 7 мм.**



**Внешний вид магнитометра ВМ-2К**



**Измеренная кривая гистерезиса тонкой пленки Fe на лавсановой подложке**

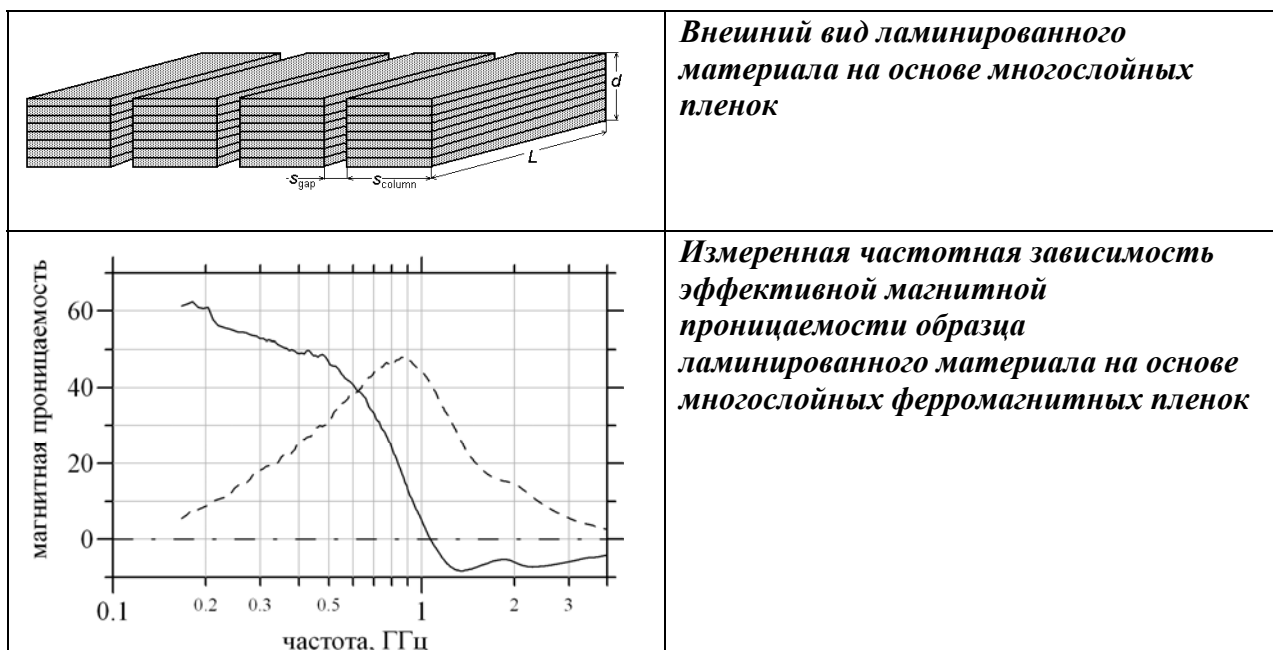
**3. Квазиоптическая установка для измерения эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости листовых материалов при повышенных температурах. Рабочий диапазон температур – до 1200°C, рабочий диапазон частот 6-20 ГГц. Предпочтительная форма образца – лист, имеющий поперечный размер 20 см x 20 см и толщину до 5 см.**

	<p><i>Схема установки для измерения СВЧ материальных параметров листовых материалов при высоких температурах</i></p>
	<p><i>Внешний вид печи с открытой дверцей отсека для помещения исследуемых образцов.</i></p>
	<p><i>Измеренная частотная зависимость коэффициента отражения образца в печи при температуре 50°C (зеленая кривая) и 1100°C (красная кривая), и его теоретическое значение (синий пунктир).</i></p>

## Основные достижения

### 1. Сверхлегкие магнитные материалы на основе тонких ферромагнитных пленок.

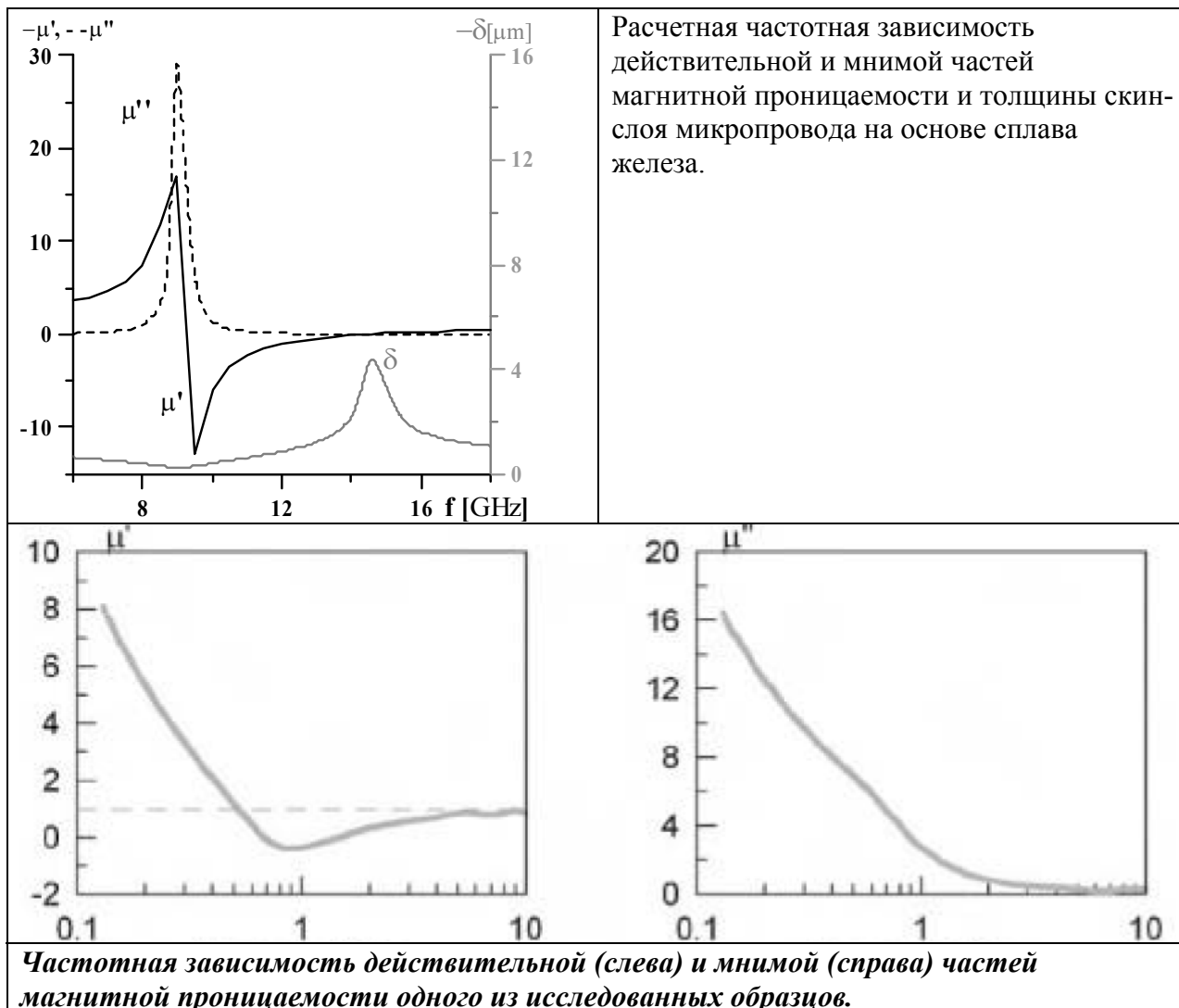
Проведено экспериментальное исследование динамических магнитных свойств тонких ферромагнитных пленок. На основе накопленных экспериментальных данных созданы массивные композитные материалы с рекордно высокими (для данной концентрации ферромагнетика) значениями СВЧ магнитной проницаемости. В частности, на рисунке представлен образец на основе пленок пермаллоя для частот ниже 1 ГГц: он представляет собой ламинат – стопку или стопки из склеенных между собой многослойных пленок пермаллоя размером  $5 \times 40 \times 0.4$  мм<sup>3</sup>. При содержании магнитной фазы 22% разработанный материал имеет значение статической проницаемости 60 и пик потерь величиной около 50 на частоте 1 ГГц, рис. 1. Разработанный материал может найти применение в ряде технических приложений, в том числе, для расширения рабочего диапазона миниатюрных полосковых антенн.



### 2. Метаматериалы на основе остеклованных наноаморфных микропроводов

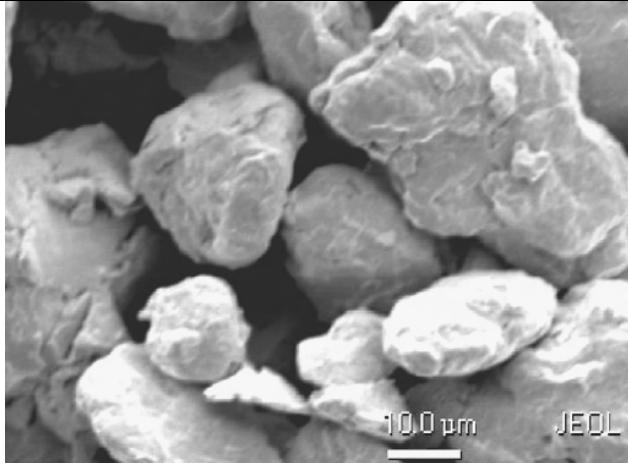
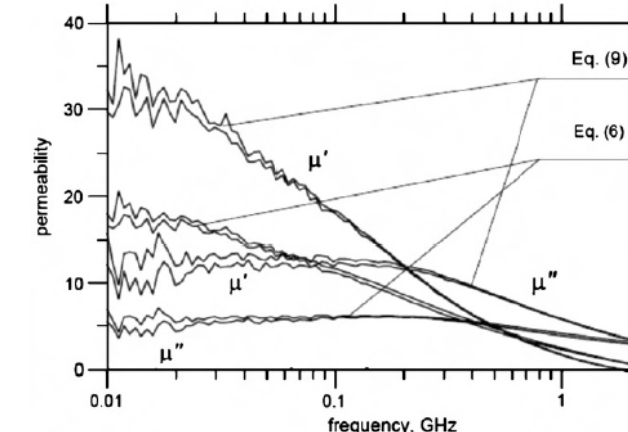
Исследована динамическая магнитная проницаемость аморфных ферромагнитных микропроводов из сплава Co-Fe-Cr-B-Si, покрытых стеклянной оболочкой. Концентрация магнитной фазы в образце составляла до 10%. Магнитная проницаемость таких образцов была измерена в коаксиальной линии в диапазоне частот от 0.1 до 10 ГГц. Действительная часть магнитной проницаемости исследованных микропроводов может принимать отрицательные значения в диапазоне частот от 0,7 до 1,5 ГГц. Типичный результат измерения приведен на рисунке, где показана частотная зависимость действительной (слева) и мнимой (справа) частей магнитной проницаемости одного из исследованных образцов.

Такие магнитные материалы могут быть использованы в области ферромагнитного резонанса для создания материалов, характеризующихся простотой изготовления, изотропными свойствами в плоскости и возможностью управления внешним постоянным магнитным полем. Спецификой материалов с магнитным микропроводом является возможность управления глубиной проникновения СВЧ поля в металл (толщиной скин-слоя провода) под действием статического внешнего магнитного поля. При этом меняется эффективная проводимость провода и, соответственно, вид диэлектрического спектра композита с отрезками такого провода.



### 3. Экспериментальное исследование СВЧ свойств композитных материалов

Проведено экспериментальное исследование динамических магнитных свойств композитных материалов с ферромагнитными порошками, в частности, полученными методом высокоэнергетического размола в жидких средах. Показано, что высокочастотные свойства композитных материалов с такими частицами определяются, в основном, не изменением состава частицы в результате взаимодействия с размольной средой, а формой и размером частиц, получаемых в результате размолла. Предложена новая формула смешения для композитных материалов с магнитными включениями, форма которых близка к сферической. Формула позволяет описать одновременно концентрационные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости композита и частотную зависимость магнитной проницаемости и может быть использована для определения собственной магнитной проницаемости включений в композитном материале, см. рисунок.

	<p><i>Внешний вид частиц одной из партий ферромагнитных порошков, полученных методом высокоэнергетического размола</i></p>
	<p><i>Восстановленная частотная зависимость собственной магнитной проницаемости порошков железа</i></p>

#### 4. Ограничения на СВЧ характеристики материалов

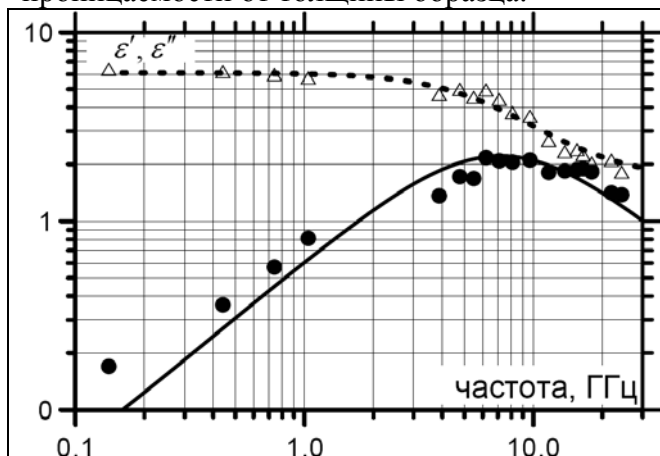
Показано, что значение логарифма модуля коэффициента отражения от произвольной многослойной магнетодиэлектрической структуры, проинтегрированное по всем длинам волн от нуля до бесконечности, ограничено сверху величиной, пропорциональной толщине структуры и усредненному значению его статической магнитной проницаемости. Полученное соотношение позволяет получить простую аналитическую оценку для предельного значения отношения ширины рабочего диапазона длин волн к толщине радиопоглощающих покрытий: эта величина пропорциональна статической магнитной проницаемости материала покрытия. В широкополосных диэлектрических покрытиях с уровнем КО –10 дБ, в том числе многослойных, отношение толщины к максимальной рабочей длине волны не может превышать 1/17,2. Полученное ограничение обобщено также на случай наклонного падения электромагнитной волны.

Рассмотрены также ограничения на радиофизические свойства магнитных материалов, в т.ч. композитных. Исследованы случаи тонких ферромагнитных пленок, гексагональных ферритов и магнитных проводов с циркулярной намагниченностью, для которых высокочастотная проницаемость может превышать предел Снука. Получены предельные значения, которые может принимать высокочастотная магнитная проницаемость в этих материалах. С учетом полученных результатов уточнены ограничения на широкополосность магнитных радиопоглотителей.

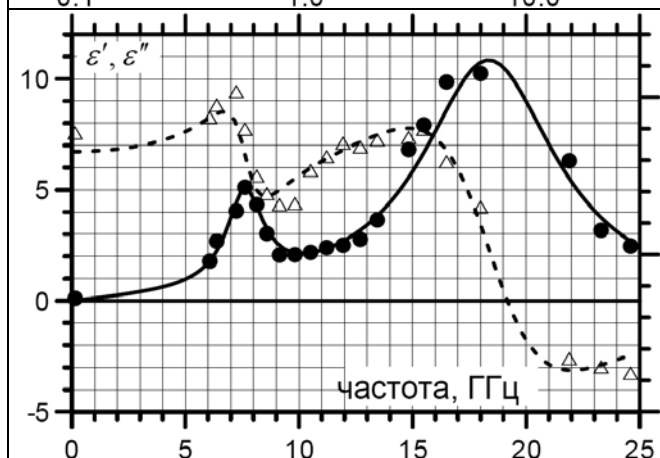
#### 5. Экспериментальное исследование композитных материалов с проводящими волокнами.

Показано, что свойства композитных материалов с проводящими волокнами определяются геометрией материала, а действительная часть диэлектрической проницаемости может принимать отрицательные значения в определенном частотном диапазоне. Таким образом, эти композиты можно отнести к метаматериалам.

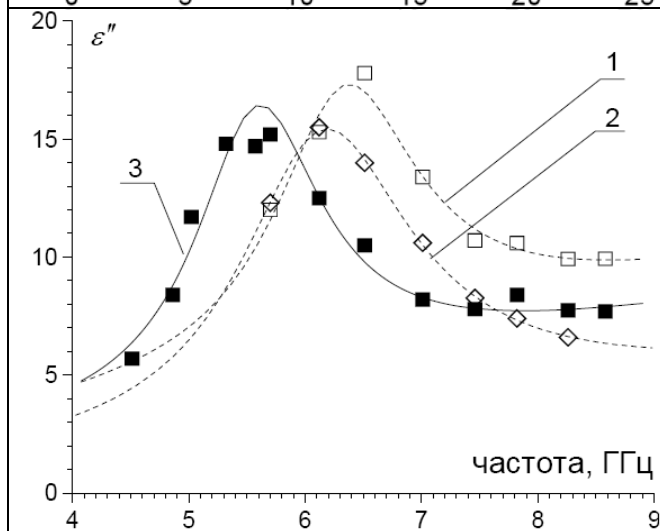
Экспериментально показано, что, подобно метаматериалам, композитные материалы с проводящими волокнами характеризуются зависимостью эффективной диэлектрической проницаемости от толщины образца.



*Измеренная частотная зависимость действительной части (треугольники) и мнимой части (круги) диэлектрической проницаемости композитного материала с углеродными волокнами УВ длиной 1,5 мм и удельным сопротивлением 10000 мкОм×см. Линии – результат аппроксимации измеренных данных дебаевской частотной зависимостью*



*Измеренная частотная зависимость диэлектрической проницаемости композитного материала, содержащего алюминизированные волокна двух различных длин: 5 мм и 12 мм ( $p=0,03\%$ ). Точки – экспериментальные данные (треугольники для действительной части и круги для мнимой части), линии – аппроксимирующая резонансная зависимость*



*Измеренный сдвиг резонансной частоты неоднородных листовых материалов при изменении толщины листа: точки 1 и 2 – измеренная мнимая часть диэлектрической проницаемости для двух образцов одинакового состава, 3 – при их сложении вместе. Линии: аппроксимирующие лоренцевы кривые*

## 6. Разработка и оптимизация методов измерения СВЧ диэлектрической и магнитной проницаемости композитных материалов

В лаборатории разработаны оригинальные методы измерения диэлектрической и магнитной проницаемости материалов в микроволновом диапазоне с использованием различных измерительных линий (коаксиальная, полосковая, замкнутая прямоугольная, в свободном пространстве). Коаксиальный и полосковый методы позволяют проводить измерения во внешнем магнитном поле. Предложенные модификации полоскового метода измерения магнитной проницаемости ферромагнитных пленок и листовых композитных материалов позволили существенно увеличить чувствительность и точность измерения.



## **Сотрудничество РФ**

- Физико-технический институт Уральского отделения РАН, г. Ижевск;

## **Зарубежное**

- Университет Миссури-Ролла, г. Ролла, США (Missouri University of Science and Technology, Rolla, MI, USA);
- Хельсинкский Университет Технологии, г. Эспу, Финляндия (Radio Laboratory, Helsinki University of Technology, Espoo, Helsinki, Finland);
- Университет электронных наук и технологий, г. Ченду, КНР (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, P.R.China);
- Национальный университет Сингапура, Сингапур (Temasek Laboratory, National University of Singapore, Singapore);
- Институт исследования материалов, Мадрид, Испания (Instituto de Ciencia de Materiales, Madrid, Spain).

## **Важнейшие публикации**

1. A.N. Lagarkov, S.M. Matytsin, K.N. Rozanov, A.K. Sarychev. Dielectric Properties of Fiber-Filled Composites, *J. Appl. Phys*, vol. 84, no. 7, p. 3806–3814, 1 Oct. 1998.
2. K.N. Rozanov, Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers, *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.*, vol. 48, no. 8, pp. 1230–1234, August 2000.
3. I.T. Iakubov, A.N. Lagarkov, S.A. Maklakov, A.V. Osipov, K.N. Rozanov, I.A. Ryjikov, N.A. Simonov, and S.N. Starostenko, Experimental Study of Microwave Permeability of Thin Fe Films, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 258–259, p. 195–197, March 2003.
4. S.M. Matytsin, K.M. Hock, L. Liu, Y.B. Gan, A.N. Lagarkov, and K.N. Rozanov, Shift of resonance frequency of long conducting fibers embedded in a composite, *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 2, July 15, 2003, pp. 1146–1154.
5. I.T. Iakubov, A.N. Lagarkov, S. A. Maklakov, et al., Microwave permeability of laminates with thin Fe-based films, *J. Magn. Magn. Mater.*, v. 272, Sp. Iss., Pt 3, pp. 2208–2210, May 2004.
6. K.N. Rozanov, Z.W. Li, L.F. Chen, M.Y. Koledintseva, Microwave permeability of Co<sub>2</sub>Z composites, *J. Appl. Phys.* vol. 97, no. 1, Art. no. 013905, 2005, 7 p.
7. L. Liu, S.M. Matitsine, Y.B. Gan, K.N. Rozanov, Effective permittivity of planar composites with random or regular conducting fibers, *J. Appl. Phys*, v 98, no 5, art. no 063512, Sept. 2005
8. P.M.T. Ikonen, K.N. Rozanov, A.V. Osipov, P. Alitalo, S.A. Tretyakov, Magnetodielectric substrates in antenna miniaturization: potential and limitations, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no 11, pt. 2, pp. 3391–3399, 2006.
9. S.N. Starostenko, K.N. Rozanov, A.V. Osipov, Microwave properties of composites with glass coated amorphous magnetic microwires, *J. Magn. Magn. Mater.*, v. 298, no. 1, pp. 56–64, March 2006.
10. L. Liu, S.M. Matitsine, Y.B. Gan, L.F. Chen, L.B. Kong, K.N. Rozanov, Frequency dependence of effective permittivity of carbon nanotube composites, *J. Appl. Phys*, 101, 09410, 2007.
11. A.N. Lagarkov and K.N. Rozanov, High-frequency behavior of magnetic composites, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 14, pp. 2082–2092, July 2009.
12. K.N. Rozanov, A.V. Osipov, D.A. Petrov, S.N. Starostenko, E.P. Yelsukov, The effect of shape distribution of inclusions on the frequency dependence of permeability in composites, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 321, no. 7, Apr. 2009, pp. 738–741.
13. A.O. Karilainen, P.M.T. Ikonen, C.R. Simovski, S.A. Tretyakov, A.N. Lagarkov, S.A. Maklakov, K.N. Rozanov, S.N. Starostenko, Experimental studies on antenna miniaturisation using magneto-dielectric and dielectric materials, *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 4, pp. 495–502, Mar. 2011.

14. K.N. Rozanov, M.Y. Koledintseva, and J.L. Drewniak, A mixing rule for predicting of frequency dependence of material parameters in magnetic composites, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 324, no. 6, March 2012, pp. 1063–1066.
15. Liu, L., Rozanov, K.N., Abshinova, M., Tunable properties of microwire composites at microwave frequency, *Appl. Phys. A – Materials Sci. Process.*, vol. 110, no. 2, pp. 275–279, Feb. 2012.
16. M. Han, D. Liang, K. N. Rozanov, L. Deng, Microwave permeability and Mössbauer spectra of flaky Fe-Si-Al particles, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 3, pp. 982–985, March 2013.