

Российская академия наук
Уральское отделение



Уральский
федеральный
университет

Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости нанокопозита на основе эпоксидной смолы с разным содержанием Ni@C

Баранов Д.К.², Некрасов И.А.^{1,2}, Бекетов И.В.^{1,2}, Багазеев А.В.²,
Малкин А.И.³, Князев Н.С.³

¹⁾ Кафедра электрофизики ФТИ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

²⁾ Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³⁾ Департамент радиоэлектроники и связи ИРИТ-РТФ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Екатеринбург 2024

Постановка задачи

Фундаментальная задача: возможность создания новых материалов с поглощающей полосой заданной формы в заданном диапазоне частот.

Цель работы: расчет диэлектрической проницаемости магнитных нанокompозитов типа металл-диэлектрик в X-полосе (8-23ГГц) СВЧ диапазона (λ порядка 3см).

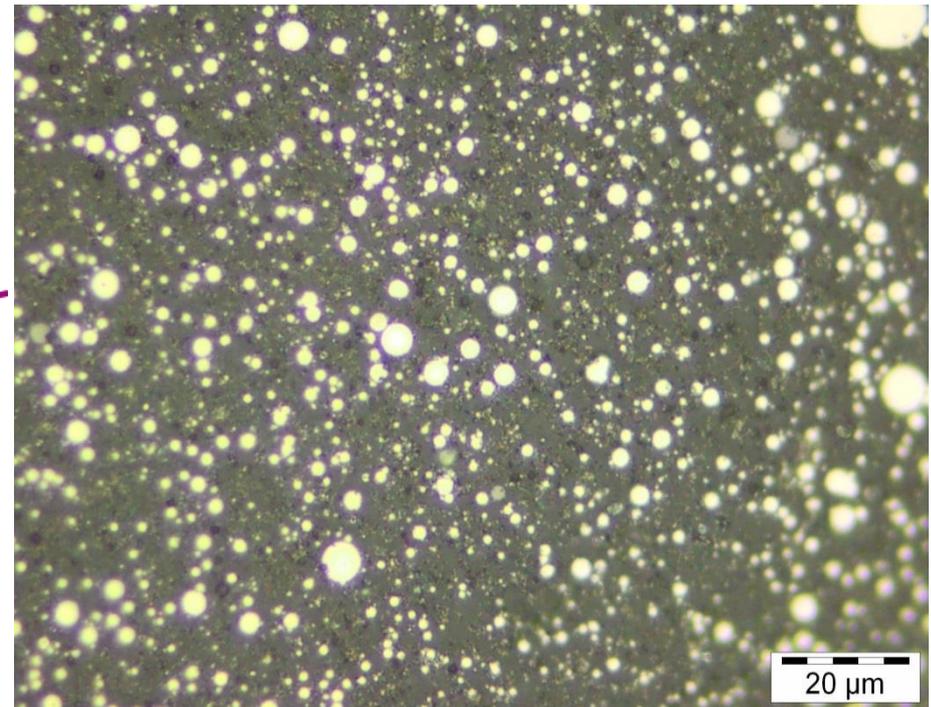
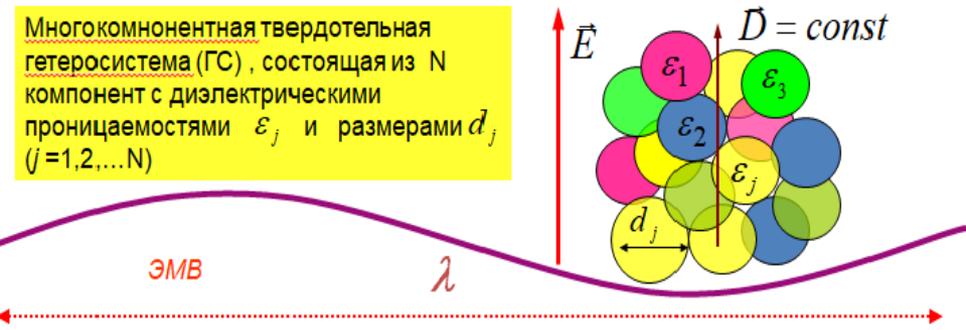
Объект исследования: нанокompозиты, состоящие из матрицы эпоксидной смолы с массовой долей включений наночастиц металла 5%, 10%, 20% и 40% со средним радиусом 100-150 нм, толщина оболочки для образцов Ni@C – 5нм.

Нанокompозиты синтезированы в Лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН (Бекетов И.В., Багазеев А.В.).

Измерения проведены в ИРИТ-РТФ УрФУ (Князев Н.С., Малкин А.И.)

Характерный вид нанокompозита

Многокомпонентная твердотельная гетеросистема (ГС), состоящая из N компонент с диэлектрическими проницаемостями ε_j и размерами d_j ($j=1,2,\dots,N$)



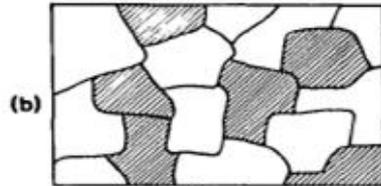
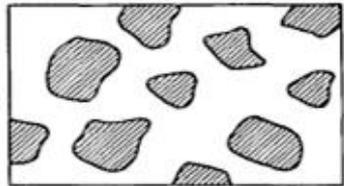
Если характерные размеры структурных элементов d (10мкм) каждой из фаз много меньше длины ЭМВ λ (3см), то гетеросистема может быть рассмотрена как однородная среда, а ее свойства могут быть описаны эффективной диэлектрической проницаемостью ε_{eff} .

Фотографии нанокompозитов сделаны на оптическом микроскопе в лаборатории ЛПЭ Колеух Д.С., полировка образцов Киселев Д.Г. (ЛПЧ).

Эффективная диэлектрическая проницаемость (сферическая модель)

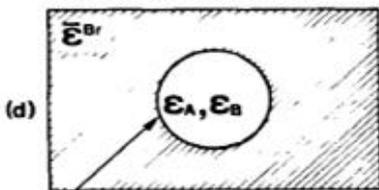
Separated-grain structure

Aggregate structure



Material "A"; filling factor f
 Material "B"; filling factor $1-f$

Bruggeman theory



Probability f of being "A"
 Probability $1-f$ of being "B"

$$\vec{E}_i = \frac{3\varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_i} \langle \vec{E} \rangle,$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость композитной среды определяется уравнением:

$$\langle \vec{D} \rangle = \varepsilon_0 \varepsilon_{eff} \langle \vec{E} \rangle,$$

где:

$\langle \vec{D} \rangle$ – усредненная по объему величина вектора электрической индукции,

$\langle \vec{E} \rangle$ – средний по объему вектор напряженности электрического поля в среде.

В качестве основных модельных приближений в теории эффективной среды рассматриваются два типа ГС:

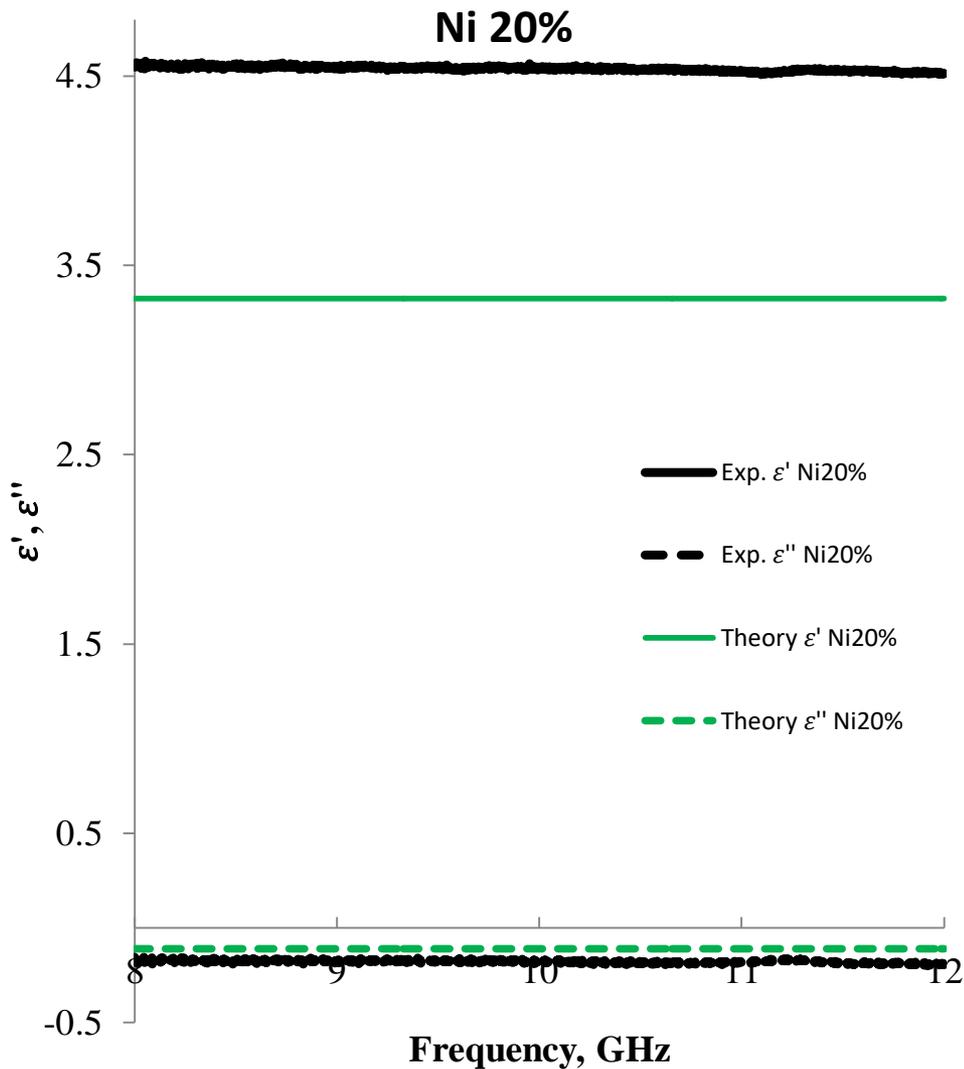
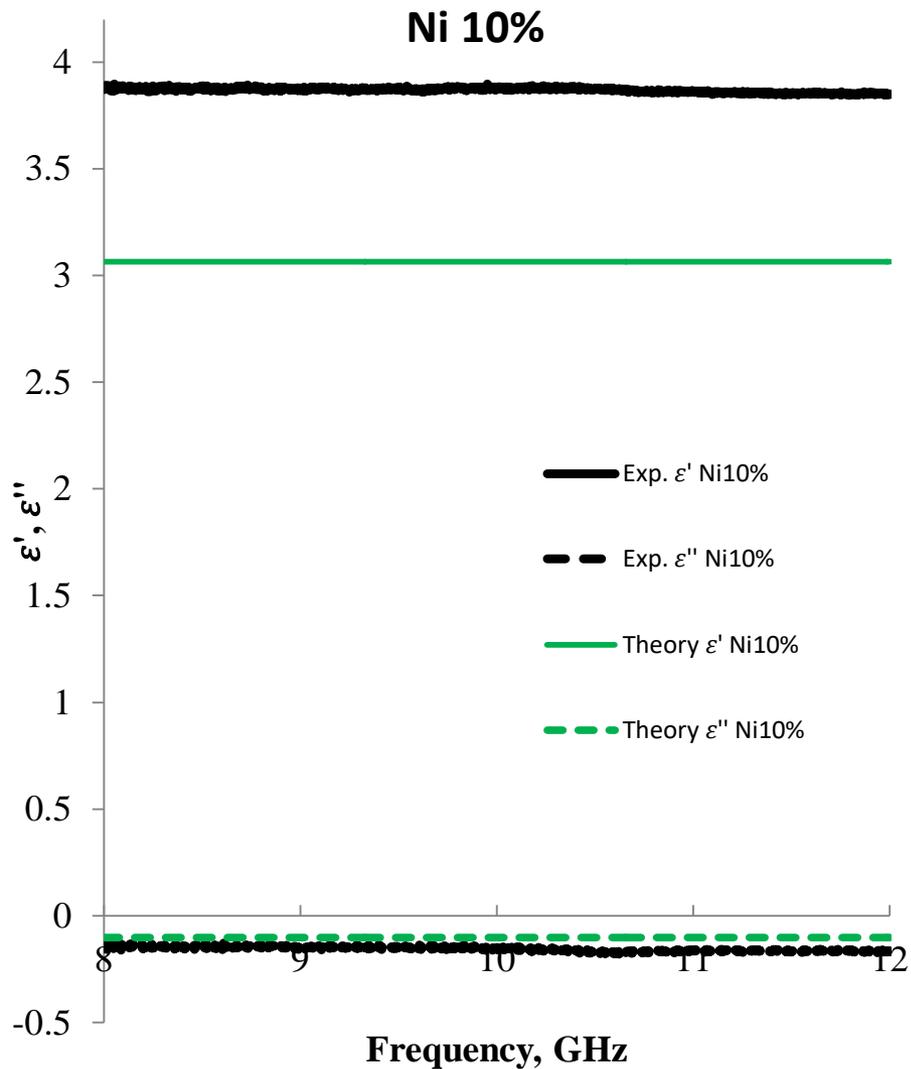
- 1) матричные ГС, в которых каждый элемент среды-включения окружен со всех сторон некоторой средой-матрицей, и взаимодействием элементов включения можно пренебречь;
- 2) статистические ГС, для которых все компоненты среды равноправны

$$f_1 \frac{3\varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_1} + f_2 \frac{3\varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_2} = 1 - \text{формула Бруггемана,}$$

где f_1 и f_2 – факторы заполнения

Bruggeman, D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen .

Сравнение теоретических и экспериментальных данных (наноккомпозиты Ni)

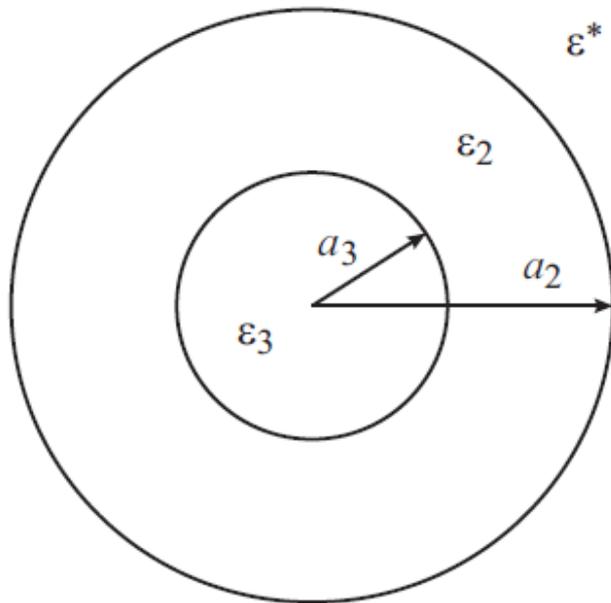


Эффективная диэлектрическая проницаемость двуслойных частиц

$$f_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_1} + f_2 \left(\frac{3\varepsilon_{eff}(\varepsilon_3 + 2\varepsilon_2) + \beta(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{eff})(\varepsilon_3 + 2\varepsilon_2) + 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_{eff})(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)\beta} + 1 \right) = 0$$

где $\beta = \frac{(\alpha_3)^3}{(\alpha_2)^3}$, f_1 и f_2 -объемные концентрации, ε_1 -диэлектрическая проницаемость матрицы,

ε_2 -диэлектрическая проницаемость оболочки, ε_3 -диэлектрическая проницаемость наполнителя.



При $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$ и $f_1 + f_2 = 1$ получаем:

$$(1 - f_2) \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{eff}}{2\varepsilon_{eff} + \varepsilon_1} + f_2 \left(\frac{3\varepsilon_{eff} - \beta}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_{eff} + 2(\varepsilon_2 - \varepsilon_{eff})\beta} + 1 \right) = 0$$

О модели эффективной среды для частиц со сложной структурой

Л.А. Апресян, Д.В. Власов, Д.А. Задорин, В.И. Красовский

Эффективная диэлектрическая проницаемость двуслойных частиц

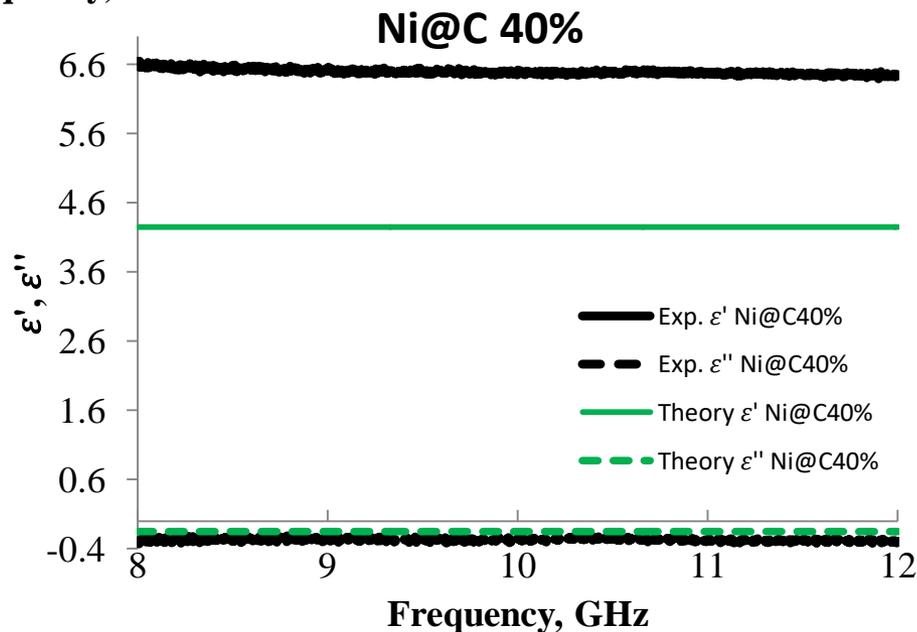
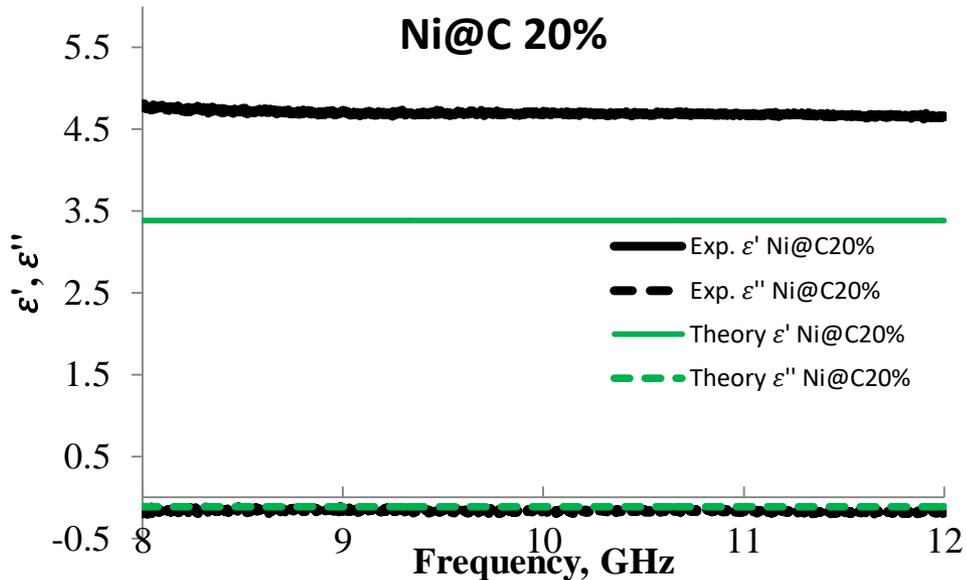
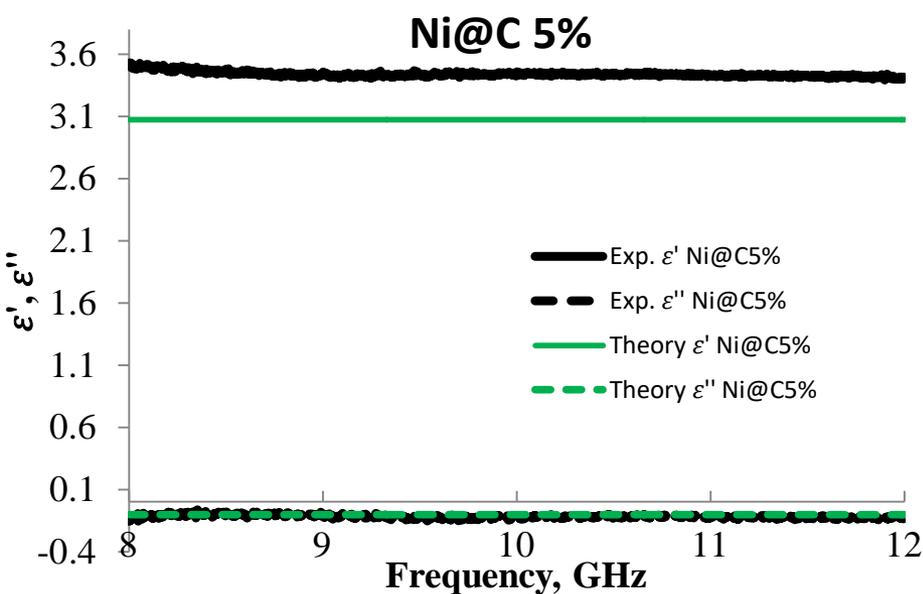
Получаем:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{H_a \pm \sqrt{H_b}}{4 + 12f_2(\beta - 2) - 4\beta}$$

$$H_a = 2\varepsilon_1 + 3f_2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + 3f_2\varepsilon_2 + 2f_2\beta - 2\varepsilon_1\beta - 2\varepsilon_2\beta + 6f_2\varepsilon_2\beta$$

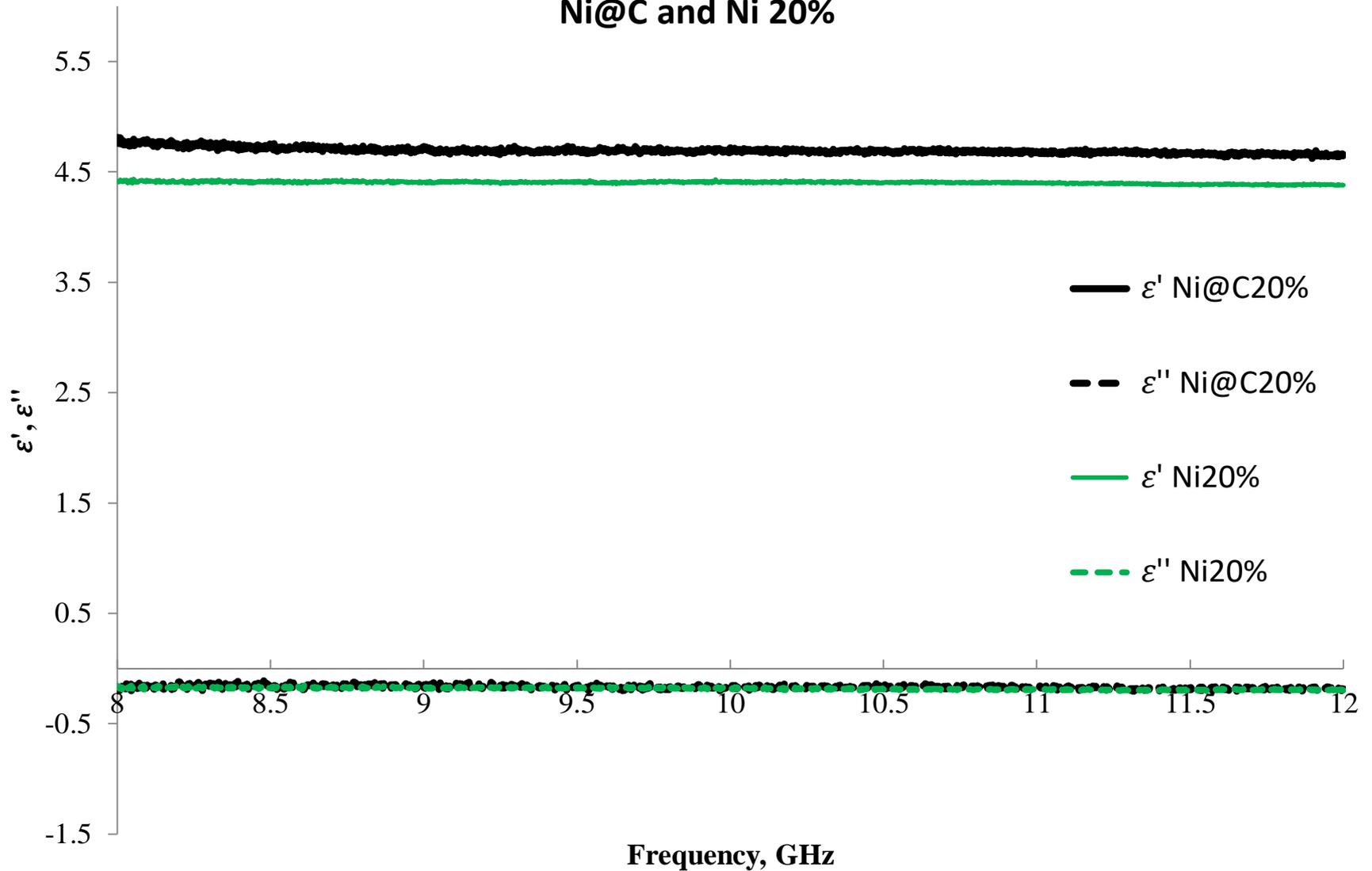
$$H_b = 8\varepsilon_1(1 + 3f_2(\beta - 2) - \beta)(\varepsilon_2 + f_2\beta + 2\varepsilon_2\beta) + \\ + (\varepsilon_1(2 + 3f_2 - 2\beta) + 2f_2\beta + (3f_2 - 1)\varepsilon_2(1 + 2\beta))^2$$

Сравнение теоретических и экспериментальных данных (нанокompозиты Ni@C)



Сравнение экспериментальных данных (наноккомпозиты Ni@C и Ni)

Ni@C and Ni 20%



Выводы

1. С ростом концентрации наночастиц в образце возрастает действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} , в следствии возрастания объемной доли металлических включений;
2. Данный подход позволяет качественно описывать поведение эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} для композитов с однослойными и двуслойными частицами.

Проект поддерживается грантом РНФ № 21-79-10394.