

ЛАМИНИРОВАННЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВЧ: ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ

А.В. Осипов * ¹, С.Ю. Бобровский¹, П.А. Зезюлина¹, А.Н. Лагарьков¹, С.А. Маклаков¹,
С.С. Маклаков¹, Д.А. Петров ¹, К.Н. Розанов¹, И.А. Рыжиков¹, А.О. Ширяев ¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 19.09.2023
Одобрена после рецензирования 29.11.2023
Принята к публикации 28.12.2023

Аннотация

Для решения многих задач микроволновой техники необходимы объемные материалы с максимально высокими значениями магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне. Известно, что предельные значения достижимы при использовании тонких ферромагнитных пленок. Статья представляет собой обзор результатов, полученных в ходе разработки нового типа композитных материалов - ламинатов, изготовленных из многослойных тонких ферромагнитных пленок, нанесенных на лавсановую подложку; рассмотрены теоретические оценки их применения и обнаруженные в ходе экспериментальных исследований ограничения, оценивается современное состояние дел и перспективы развития.

Ключевые слова: высокочастотные измерения, магнитные материалы, тонкие пленки, СВЧ магнитная проницаемость, ферромагнитный резонанс

EDN HEUZUM

doi:[10.24412/2949-0553-2023-57-39-57](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2023-57-39-57)

1. Введение

Магнитные материалы с высокими значениями динамической магнитной проницаемости широко используются в радиотехнике, в частности, при разработке и производстве полосковых антенн [1, 2], RFID-антенн [3, 4], высокочастотных трансформаторов [5–7], поглотителей электромагнитных волн [8, 9], датчиков магнитного поля [10, 11], в решении проблем электромагнитной совместимости [12, 13], технике связи [14], и т.д. Общая тенденция в развитии современной техники состоит в продвижении в область все более высоких частот, в направлении повышения скорости передачи данных и передаваемого объема данных, а также снижения геометрических размеров техники [15]. На данный момент верхняя граница используемых для этих целей частот перешла в СВЧ диапазон (от 3 до 30 ГГц по международному регламенту [16]), поэтому особую актуальность приобретает поиск соответствующих магнитных материалов путем как оптимизации уже известных, так и создания новых.

Для антенных применений требуются объемные материалы с высоким значением действительной части магнитной проницаемости и низким значением мнимой. Для поглощения электромагнитных волн, наоборот, нужны как можно более высокие магнитные потери в рабочем диапазоне частот; но и в этом случае, как следует из соотношений Крамерса-Кронига [17], ширина полосы поглощения, которая является одной из ключевых характеристик поглотителя, прямо пропорциональна его статической проницаемости. Таким образом, для всех рассмотренных приложений требуются магнитные материалы с максимально высокими значениями статической магнитной проницаемости на СВЧ и максимально высокочастотными магнитными потерями.

Наибольший вклад в динамические магнитные свойства материалов в СВЧ диапазоне дает ферромагнитный резонанс (ФМР). В случае высокочастотного ФМР магнитная проницаемость на частотах ниже частоты резонанса, f_p , близка к своему статическому значению, $\mu_{ст}$, и резко снижается до 1 на частотах выше f_p , пик потерь также находится вблизи f_p .

* Автор, ответственный за переписку: Алексей Владимирович Осипов, avosipov@mail.ru

Для большинства магнитных материалов значения статической магнитной проницаемости $\mu_{ст}$ и частоты резонанса f_p связаны между собой хорошо известным законом Снука:

$$(\mu_{ст} - 1)f_p = 2/3(\gamma 4\pi M_0), \quad (1)$$

где их произведение прямо пропорционально намагниченности насыщения материала M_0 (γ - гиромагнитный фактор, $\gamma \approx 3$ ГГц/кЭ; множитель $2/3$ учитывает изотропное распределение магнитных моментов в объеме). Этот закон накладывает ограничение на величину СВЧ магнитной проницаемости: она тем ниже, чем более высокочастотный материал необходим. В связи с этим интерес представляют материалы, которые не подчиняются стандартной форме закона Снука, а именно: тонкие пленки [18], композиты, наполненные плоскими включениями [19], гексагональные ферриты [20] и ферромагнитные микропровода с циркулярной магнитной анизотропией [21]. Такие материалы позволяют получить предельно достижимые для данного ферромагнетика значения СВЧ магнитной проницаемости.

В данной статье представлены результаты исследовательской работы авторского коллектива по созданию объемных ламинированных материалов на основе тонких ферромагнитных пленок [22–27] как одного из перспективных направлений в решении задачи создания магнитных материалов для СВЧ диапазона с предельно достижимыми значениями магнитной проницаемости. В разделе 2 рассмотрены теоретические оценки возможностей такого типа материалов, подробности постановки эксперимента описаны в разделе 3, в разделе 4 показаны ограничения, возникающие в процессе практической реализации объемных ламинированных материалов.

2. Теоретические оценки

Использование плоских (максимально близких по форме к тонким пленкам) магнитных включений позволяет преодолеть предел закона Снука (1), лимитирующий значения магнитной проницаемости в диапазоне СВЧ для объемных материалов (таких как ферриты) и композитов, наполненных сферическими и близкими к ним по форме включениями, и получить максимально возможные для данного магнетика значения высокочастотной магнитной проницаемости, которые в этом случае подчиняются аналогу закона Снука – закону Аше [19, 24, 28]:

$$(\mu_{ст} - 1)f_p^2 = d(\gamma 4\pi M_0)^2, \quad (2)$$

где d – множитель, учитывающий пространственное распределение магнитных моментов ($d = 1$ для анизотропной пленки, $d = 1/2$ для изотропной пленки, $d = 1/3$ для изотропного объемного материала). К примеру, для Fe ($M_0 = 1720$ Гс в системе СГС) разница между предельными значениями закона Снука (1) и закона Аше (2) может достигать порядка и более [29, 30], как это показано на рисунке 1. Из рисунка видно, что эта разница тем выше, чем ниже частота резонанса: до 10 ГГц – порядок и более, от 10 до 20 ГГц – в 3-10 раз, на частотах выше 20 ГГц, в зависимости от d , разница между пределами Снука и Аше нивелируется.

Необходимо также заметить, что в формуле Аше (2) в неявном виде заложена магнитная структура включений: во-первых, предполагается, что все они характеризуются планарной магнитной анизотропией (вектор намагниченности лежит в плоскости пленки); во-вторых, требование плоской формы относится не к включению, а к доменам: их ширина должна существенно превышать высоту. В [31] показано, что при нарушении первого условия – выходе вектора намагниченности из плоскости – значение статической проницаемости $\mu_{ст}$ сохраняется неизменным, а частота ФМР f_p снижается, так что в предельном случае, при достижении состояния перпендикулярной магнитной анизотропии (вектор намагниченности направлен по нормали к плоскости пленки), параметры резонанса соответствуют закону Снука (с множителем не $2/3$, как в исходной формуле, выведенной для равновероятного распределением магнитных моментов в объеме, а 1 с учетом анизотропии пленки). Нарушение второго условия – отклонение формы доменов от идеально плоской, когда ширина домена становится сопоставима с высотой, вследствие чего отклоняются от своих предельных значений и коэффициенты размагничивания – приводит к снижению и величины статической проницаемости [32], так что эффективность магнетика падает еще ниже. Таким образом, любое отклонение от оптимальной магнитной структуры приводит к снижению предела Аше.

Из (2) видно, что предельное значение СВЧ магнитной проницаемости определяется, с одной стороны, намагниченностью насыщения M_0 , с другой стороны - частотой резонанса f_p . Если намагниченность насыщения магнетика – величина постоянная, то частота резонанса существенным образом зависит от технологических параметров в процессе нанесения пленки. На рис. 2 представлены предельные линии Аше для разных ферромагнетиков, построенные на основе имеющихся в литературе экспериментальных данных [33–43] (пунктир – предельное значение $\mu_{ст}$, соответствующее низшей

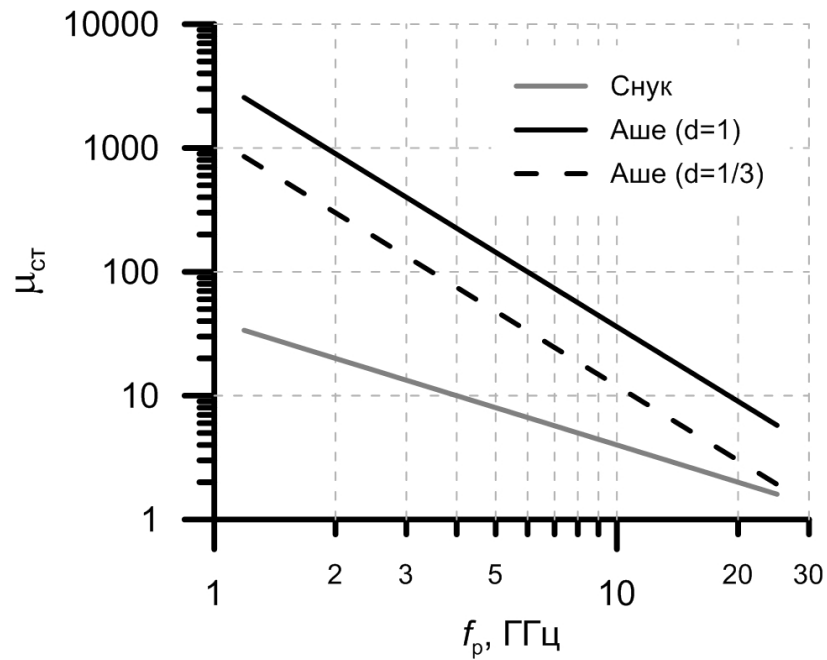


Рисунок 1 – Предельные линии Снука и Аше для Fe

из зафиксированных в экспериментах f_p). Из графика следует, что выбор магнитного материала в каждом конкретном случае будет определяться его намагниченностью насыщения и требуемым рабочим диапазоном частот (частота ФМР как частота отсечки должна быть вблизи верхней границы рабочего диапазона). В частности, как видно из графика, на низких частотах, от 0,5 до 1,5 ГГц, целесообразным является применение классического пермаллоя ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), в диапазоне от 3 до 7 ГГц – пленок Fe или Co, выше 7 ГГц – железо-кобальтового сплава $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{40}$. Впрочем, оба параметра - и намагниченность насыщения, и частота резонанса - управляются в достаточно широких пределах: подбором состава мишени, толщин магнетика [27, 55], состава вакуумной атмосферы при нанесении [35], технологических параметров в процессе нанесения [36, 39], и т.д.

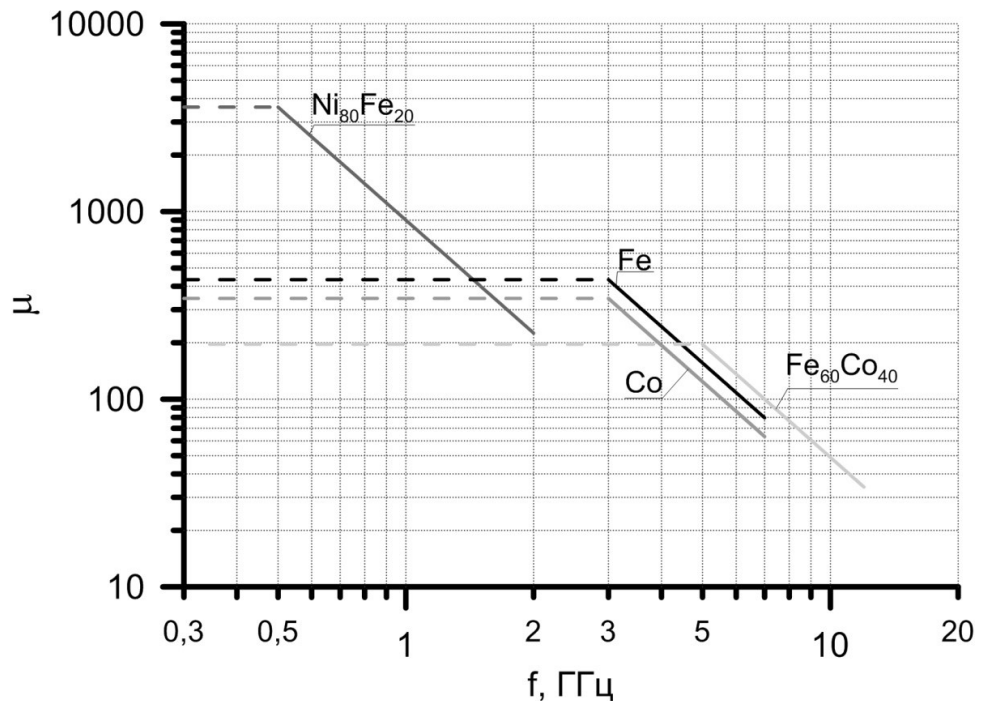


Рисунок 2 – Предельные линии Аше для ферромагнитных металлов и сплавов

Первое описание материалов на основе тонких магнитных пленок (ТМП) появилось в 1970 году, в патенте [44]: в нем представлен новый тип магнитных материалов, способный работать в диапазоне

частот от 10 МГц до 100 ГГц, который представляет собой «упорядоченное множество макроскопических элементов из тонких магнитных пленок, погруженных в изолирующую среду». По сути, это двумерный (далее для сокращения – 2D) композит с плоско-параллельной структурой, представленный многослойными «плитками», упорядоченно выложенными по поверхности и отделенными друг от друга изолятором (рис. 3). В целом патент содержит развернутое описание и во многом закладывает основы нового типа материалов, а именно:

- толщина металлических пленок должна быть меньше толщины скин-слоя на максимальной частоте рабочего диапазона;
- описана возможность оптимизации радиофизических свойств путем подбора характеристик магнитного материала и формы включений, создания искусственной магнитной анизотропии в разрабатываемом композите упорядочением осей магнитной анизотропии;
- учтено влияние на радиочастотный отклик диэлектрической проницаемости;
- предложена оптимизированная методика изготовления многослойных пленок с помощью вакуумного магнетрона, в которой нанесение слоев магнетика и изолятора идет в одном технологическом процессе;
- практически реализованы две технологии получения описываемых структурированных многослойных магнитных материалов: нанесением через маску и химическим травлением, представлены магнитные свойства полученных с их помощью реальных прототипов.

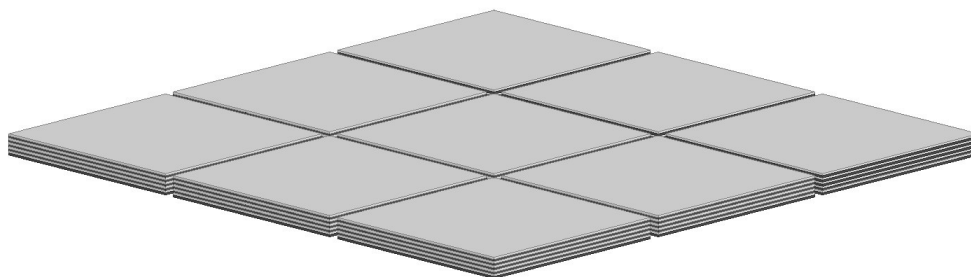


Рисунок 3 – Эскиз 2D композита

Затем следует пауза (обусловленная, судя по всему, тем, что работа в данном направлении шла под грифом “секретно” – это подтверждается тем, что практически все последующие патенты представлены от организаций, связанных с ВПК), и с 90-х годов эта тема открывается вновь в США тем же автором, R. Walser [19, 45], параллельно во Франции исследовательской группой под руководством O. Acher [46, 47]. Постепенно работы по исследованию таких материалов распространяются по всему миру [48]. Кроме того, публикуются патенты, в которых развиваются как 2D материалы [49, 50], так и композиты в классическом трехмерном (здесь и далее – 3D) варианте (рис. 4), представляющие собой случайным образом распределенные в объеме матрицы измельченные осколки однослойных или многослойных магнитных пленок [51, 52].

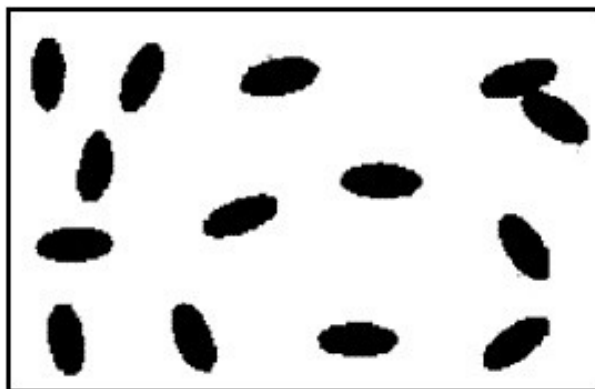


Рисунок 4 – Эскиз 3D композита

Какой из этих вариантов предпочтительней? И тот, и другой имеют свои преимущества и недостатки, поэтому выбор типа композита определяется конкретной задачей. К преимуществам 2D композитов следует отнести, во-первых, более низкий разброс свойств ввиду высокой однородности включений

по форме и по собственной магнитной проницаемости, как следствие, более высокую добротность, во-вторых, за счет разницы в d - более высокие при равном объемном наполнении значения магнитной проницаемости (в 1,5 раза в случае изотропного в плоскости образца и в 3 раза – в случае анизотропного), в-третьих, предельно низкое (для одной и той же формы включений) соотношение диэлектрической и магнитной проницаемостей, ε/μ , что улучшает согласование со свободным пространством и повышает тем самым эффективность взаимодействия излучения с материалом. К недостаткам можно отнести более трудоемкую технологию изготовления (используется вакуумная технология нанесения, ручное изготовление образцов), а также низкое наполнение из-за существенной доли немагнитных компонент (подложка, изолирующие диэлектрические прослойки, клей и т.п.). Исходя из цели разработки материала с максимально возможным значением магнитной проницаемости, воспользуемся выигрышем 2D композитов за счет анизотропии.

Теория композитов, содержащих плоские ферромагнитные включения, достаточно широко представлена в литературе [18, 19, 53], поэтому здесь рассматриваться не будет.

На практике, как правило, требуются материалы толщиной порядка нескольких миллиметров. Между тем, толщина ферромагнитных пленок ограничена – их СВЧ магнитные свойства с увеличением толщины ухудшаются вследствие ряда эффектов [27]: скинирования [43], перехода в «закритическое» состояние (состояние с перпендикулярной магнитной анизотропией) [42, 54, 55], накопления дефектов и вызванного им значительного роста затухания [27]. Поэтому предельная толщина большинства магнитных пленок, как правило, не превышает нескольких сотен нанометров [55, 56]. Соответственно, чтобы набрать требуемую толщину, необходимо напылить сотни и тысячи магнитных слоев.

В литературе имеется большое количество статей по исследованию многослойных тонких магнитных пленок, но практически все рассматриваются для использования в качестве датчиков и имеют относительно небольшое количество слоев (максимум 10 [57]), научных работ других исследовательских групп по разработке и исследованию именно объемных материалов с большим числом слоев не обнаружено.

3. Детали эксперимента

Постановка эксперимента подробно описана в [35]. Пленки ферромагнитного металла нанесены методом магнетронного распыления в вакууме на тонкую 12-мкм лавсановую подложку размером 60×20 см², которая крепится на вращающийся барабан. Толщины слоев магнетика и диэлектрика были определены по электронным фотографиям среза.

СВЧ магнитная проницаемость пленок измерена в коаксиальной линии стандарта 7/3 в диапазоне частот от 0,1 до 18 ГГц [58]. Образцы для измерений представляют собой цилиндрические рулоны, в поперечном сечении соответствующие сечению коаксиальной линии, скрученные из тонких полосок исходной пленки.

Образцы ламинатов сделаны из многослойных пленок, склеенных в стопку под прессом (более подробно можно посмотреть [26]). Объемная концентрация магнетика в образцах ламината p_m варьируется от 5 до 28%.

СВЧ магнитная проницаемость ламинированных образцов измерена в микрополосковой линии и в волноводе сечением 72×34 мм (детали рассмотрены в [24]). Образцы для измерений представляют собой плоские прямоугольники: для микрополосковой ячейки – размером 5×40 мм² и высотой 0,5-0,7 мм, для прямоугольного волновода – размером 5×5 мм² высотой 0,7 мм, упорядоченно выложенные на короткозамыкающей пластине с зазором по обоим направлениям.

Анализ данных строится на изучении зависимости от толщины параметров ФМР, полученных путем аппроксимации частотных зависимостей суммой резонансных кривых Лоренца [59]:

$$\mu(f) = 1 + \sum_j \frac{4\pi\chi_{ст,j}}{1 - i\beta_j(f/f_{p,j}) - (f/f_{p,j})^2}, \quad (3)$$

где $\chi_{ст}$ – статическая магнитная восприимчивость ($\mu_{ст} = 1 + \sum 4\pi\chi_{ст,j}$), β_j – фактор затухания.

Из теории ФМР в тонких пленках с полосовой доменной структурой [31] следует, что максимальные значения магнитной проницаемости достижимы при условии планарной магнитной анизотропии (вектор намагниченности лежит в плоскости пленки) и ограничены законом Аше (2), минимальные – при условии перпендикулярной магнитной анизотропии (вектор намагниченности направлен по нормали к плоскости пленки) и ограничены законом Снука (1) (с множителем 1, а не 2/3). Таким образом, в случае пленок законы Снука и Аше выступают в качестве нижнего и верхнего пределов значений СВЧ магнитной проницаемости тонких пленок на некоторой частоте. Поэтому для оценки экспериментальных

значений СВЧ магнитной проницаемости исследуемых пленок удобно ввести коэффициенты, которые позволяют численно оценить степень приближения к этим пределам – коэффициенты Снука и Аше [27]:

$$k_C = (\mu_{ст} - 1) f_p / (\gamma 4\pi M_0), \quad k_A = (\mu_{ст} - 1) f_p^2 / (\gamma 4\pi M_0)^2. \quad (4)$$

В динамике коэффициентов есть разница: коэффициент Снука при отклонении от перпендикулярной анизотропии растет (соответственно, стремится к единице сверху ($k_C \geq 1$)), коэффициент Аше при отклонении от планарной магнитной анизотропии падает ($k_A \leq 1$).

4. Практические ограничения

4.1. Предельная толщина магнитных слоев

Исследование зависимости статических и динамических магнитных свойств однослойных ферромагнитных пленок от их толщины, проведенное для ряда ферромагнетиков (Fe, Co, пермаллой $Ni_{80}Fe_{20}$ (здесь и далее – Py), промышленный сплав 79НМ, Fe-N (железо, напыленное в вакуумной атмосфере аргона с добавлением азота [35])) показало, что с ростом толщины происходит существенное снижение их динамических магнитных свойств [27, 33, 35]. Толщина пленок варьировалась в широких пределах – от 0,02 до 2 мкм. В основе наблюдаемого ухудшения с ростом толщины пленок их динамических магнитных свойств лежат два физических механизма: первый, характерный для всех пленок – рост фактора затухания β вследствие накопления дефектов в объеме пленки, второй, наблюдаемый для части исследуемых магнетиков – выход вектора намагниченности из плоскости, завершающийся переходом в «закритическое» состояние. В первом случае магнитная структура в целом сохраняется, и снижение динамических магнитных свойств происходит постепенно, во втором случае характер изменений резкий, скачкообразный. В пленках, в которых наблюдаются оба механизма, доминирующим является выход вектора намагниченности из плоскости. Что касается скин-эффекта, его вклад становится заметным начиная с толщины, близкой к толщине скин-слоя [59].

Рассмотрим подробнее, как проявляются эти эффекты.

Выход вектора намагниченности из плоскости пленки

В предположении полосовой доменной структуры выход вектора намагниченности из плоскости пленки (в качестве причин рассматривается влияние магнитоупругого эффекта, усиливающегося с ростом толщины [55, 56]) вызывает снижение частоты ФМР, что ввиду квадратичной зависимости коэффициента Аше от частоты приводит к его существенному падению; два других параметра, амплитуда и параметр затухания, от выхода вектора намагниченности не зависят [31]. С ростом толщины пленок изменяется и их доменная структура, так что для некоторых из них ширина доменов становится сопоставима с толщиной – при этом условии наблюдается падение и амплитуды ФМР [32], коэффициент Аше снижается линейно пропорционально еще ниже.

Рост фактора затухания

Снижение динамических магнитных свойств вследствие роста фактора затухания носит плавный характер: статическая амплитуда и частота резонанса (следовательно, и параметр Аше) неизменны, ухудшение свойств проявляется в снижении частоты отсечки (частоты, начиная с которой величина реальной части магнитной проницаемости отклоняется от максимальной), а также частоты и высоты максимума потерь, как это показано на рисунке 5. Для удобства можно принять в качестве частоты отсечки частоту, при которой значение амплитуды снижается вдвое – в случае высоких значений фактора затухания ($\beta \gg 1$) она совпадает с частотой максимума потерь. В частности, даже при $\beta = 1$ частота, с которой начинается отклонение от максимального значения, более чем вдвое ниже заложенной в формуле Аше частоты резонанса (на графике – 4 ГГц и 10 ГГц), частота отсечки отличается от частоты резонанса на 20%. При $\beta \geq 3$ частота отсечки снижается фактически линейно пропорционально параметру затухания: N-кратному увеличению параметра затухания соответствует N-кратное снижение частоты отсечки и частоты пика потерь. Поскольку формула Аше (2), устанавливающая предельное значение амплитуды, опирается на частоту резонанса, а на практике предельное значение достигается только на частотах до частоты отсечки, наблюдается значимое расхождение в худшую сторону. Если для компенсации такого расхождения увеличивать частоту резонанса с тем, чтобы сдвинуть частоту отсечки до требуемой частоты, то, с учетом того, что в формуле Аше зависимость от частоты квадратичная, соответственно, и амплитуда падает пропорционально квадрату частоты, т.е. достаточно быстро. Таким образом, высокий рост магнитных потерь приводит к тому, что формально - по параметрам ФМР

- материал может соответствовать закону Апе, фактически же значения магнитной проницаемости, близкие к предельному, достигаются на гораздо более низких частотах.

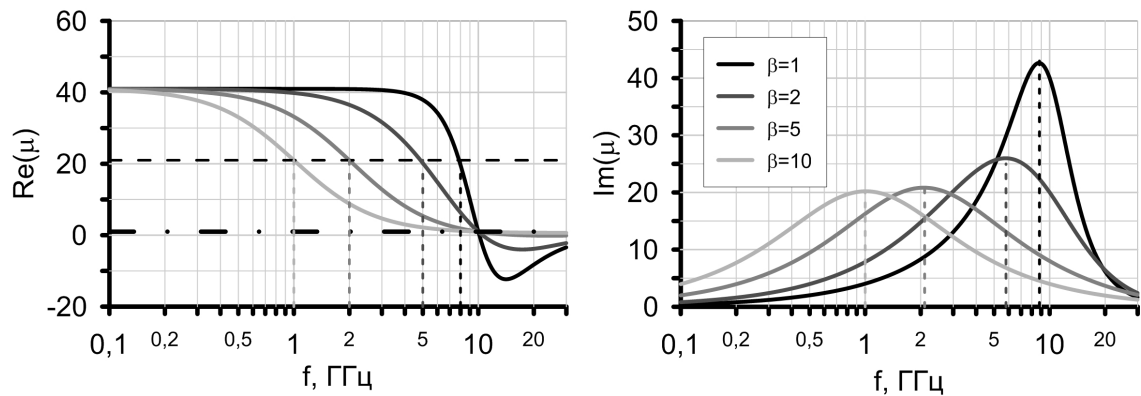


Рисунок 5 – Частотная зависимость реальной (слева) и мнимой (справа) частей магнитной проницаемости при увеличении фактора затухания

Скин-эффект

Из оценок толщины скин-слоя исследуемых магнетиков следует, что она, как правило, выше толщины перехода в закритическое состояние, поэтому в пленках имеет место слабое скинирование. В этом случае вклад вихревых токов приводит к увеличению фактора затухания β [60], так что его эффект аналогичен описанному выше увеличению потерь.

Все описанные эффекты можно увидеть на примере пленок пермаллоя ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, сокращенно Ру): на рисунке 6 представлены частотные зависимости СВЧ магнитной проницаемости пленок разной толщины и зависимость параметров ФМР от толщины, в Таблице 1 – количественные значения параметров. Как видно на графике, по мере роста толщины пленки Ру с 0,08 до 1,76 мкм амплитуда резонанса, дающего основной вклад в коэффициент Апе, падает в 3 раза одним скачком, частота ФМР снижается также в 3 раза, но постепенно (как показано в [61], за счет постепенного выхода вектора намагниченности из плоскости с переходом в «закритическое» состояние между толщинами 0,22 и 0,44 мкм). Как результат, коэффициент Апе падает в итоге в 10 раз.

Снижение за счет роста параметра затухания видно по разнице между частотными зависимостями СВЧ магнитной проницаемости пленок с толщинами 0,08 и 0,22 мкм (см. рис. 6 и табл. 1): если в более высокочастотной пленке толщиной 0,08 мкм максимальное значение реальной части сохраняется вплоть до частоты резонанса и пик потерь имеет максимальное значение на частоте резонанса, то в пленке толщиной 0,22 мкм частота отсечки в 5 раз ниже частоты резонанса, значение пика потерь снизилось в 3 раза и сместилось по частоте в 2 раза. Из таблицы 1 следует, что фактор затухания растет с толщиной как до перехода в закритическое состояние, так и после, но в первом случае наблюдаемый прирост фактора $\Delta\beta_{\text{эксп}}$ (в предположении, что $\beta = \beta_0 + \Delta\beta_{\text{скин}}$, где β_0 – собственный параметр затухания магнетика, $\Delta\beta_{\text{скин}}$ – вклад скин-эффекта) значительно – в разы – превышает вычисленный вклад скинирования (значит, имеет другую природу), тогда как во втором случае, после перехода в закритическое состояние, вполне им описывается. Оценки параметра скинирования, проведенные в [61], подтверждают, что вклад скинирования при толщине пленки ниже толщины перехода в «закритическое» состояние пренебрежимо мал.

Таблица 1 – Зависимость параметров резонанса от толщины пленки пермаллоя

h, мкм	χ	f_p	β	k_A	$\Delta\beta_{\text{скин}}/\Delta\beta_{\text{эксп}}$
0,08	333	1,7	0,28	0,99	0,01 / 0,01
0,22	340	1,1	1,0	0,42	0,09 / 0,73
0,44	130	0,8	0,45	0,2	0,11 / 0,11
0,88	92	0,7	0,7	0,05	0,46 / 0,36
1,76	110	0,6	2,5	0,02	1,8 / 2,16

В [27, 61] показано, что доминирующим источником ухудшения СВЧ магнитной проницаемости в пленках Ру и Со с ростом толщины является переход пленки в «закритическое» состояние (от планарной магнитной анизотропии к перпендикулярной), тогда как в пленках Fe – накопление дефектов и результирующий рост фактора затухания. Такая разница объясняется разницей в знаке

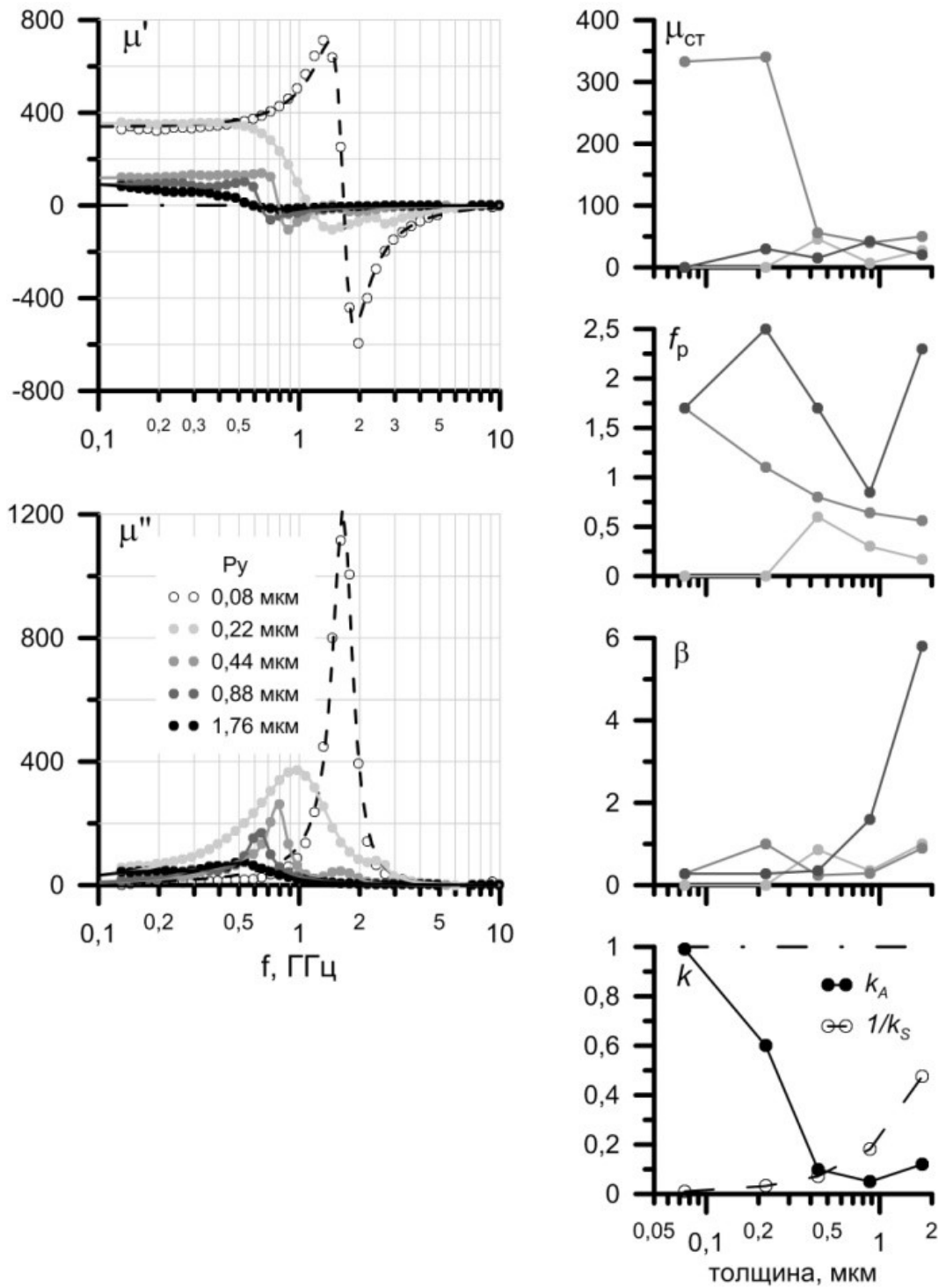


Рисунок 6 – Частотные зависимости собственной магнитной проницаемости пленок Ru разной толщины (слева) и зависимость параметров резонанса от толщины (справа)

коэффициента магнитоотрицательности: согласно [55], переход в закритическое состояние наблюдается в пленках ферромагнетиков с отрицательной магнитоотрицательностью (как Co и Ru [62]) за счет анизотропии, наведенной магнитоупругим эффектом (экспериментальные данные подтверждают, что все указанные ферромагнетики характеризуются заметным магнитоупругим эффектом в пленках [36, 61, 63]).

Есть еще один важный момент, на который необходимо обратить внимание: снижение частоты резонанса (на практике это означает сокращение рабочего диапазона сверху) вследствие выхода вектора намагниченности из плоскости начинается задолго до достижения критической толщины (толщины перехода в закритическое состояние): в частности, для пермаллоя коэффициент Аше k_A снижается вдвое между толщинами 0,08 и 0,22 мкм за счет снижения частоты ФМР, тогда как переход в закритическое состояние происходит между толщинами 0,22 и 0,44 мкм [61]. Похожая картина наблюдается и для пленок Co: коэффициент Аше падает вдвое между толщинами 0,04 и 0,16 мкм, тогда как переход в закритическое состояние происходит между толщинами 0,16 и 0,47 мкм [27]. То есть критическая толщина пленок, определяемая исходя из динамических характеристик, существенно ниже толщины перехода в закритическое состояние, определяемой по статическим характеристикам.

В пленках Fe коэффициент Аше сохраняет свое значение близким к 1 (значит, сохраняется планарная магнитная анизотропия) до толщины 1,6 мкм [27], из чего следует, что статическая магнитная проницаемость сохраняет свое максимальное значение. Но при этом у них низкая добротность уже при минимальных толщинах, поэтому частота отсечки ниже частоты резонанса, в частности, при толщине 0,08 мкм эта разница двукратна и дальше с ростом толщины быстро растет. Добротность ФМР может быть увеличена введением добавок в вакуумную атмосферу (например, азота [35]) или в состав мишени.

Из экспериментальных данных для Fe-N (рисунок 7) видно, что, начиная с толщины 0,2 мкм, фактор затухания β быстро растет: при увеличении толщины в 10 раз он увеличивается в 6 раз – с 0,5 до 3. Соответственно, частота отсечки также снижается приблизительно в 6 раз. Описываемые эффекты – снижение частоты отсечки и частоты максимума потерь – можно увидеть на графике для реальной части магнитной проницаемости: несмотря на то, что они сильно заретушированы высокочастотным сдвигом частоты резонанса, обусловленного увеличением внутреннего поля анизотропии, видно, что частота резонанса (пересечение действительной частью единицы) с ростом толщины сдвигается в высокие частоты, тогда как частота отсечки, наоборот, смещается в низкие частоты, так что расхождение между ними быстро увеличивается.

Таким образом, несмотря на то, что в основе снижения СВЧ магнитной проницаемости лежат разные физические явления, предельные толщины рассмотренных ферромагнетиков лежат в одном диапазоне – сотен нанометров. Соответственно, чтобы при толщине немагнитной фазы (подложка, клей, кварцевые прослойки) 10-20 микрометров достичь сопоставимого с трехмерными композитами объемного наполнения p (десятые доли), необходимо на одну подложку нанести несколько сотен магнитных слоев.

4.2. Предельное количество слоев

Рост числа слоев на одной подложке ограничен существенным снижением как радиофизических, так и механических (расслоение между слоями или отслоение всей системы слоев от подложки вследствие роста напряжений) свойств системы. Чтобы добиться максимального содержания магнетика, толщина прослойки должна быть минимально возможной; при этом в идеале она должна обеспечивать тройную изоляцию слоев друг от друга – электрическую, магнитную и механическую. При минимально допустимой толщине – толщине, при которой слой диэлектрика можно рассматривать сплошным, более 10 нм – прослойка хорошо выполняет функции диэлектрического изолятора, магнитной же изоляции не обеспечивает. Поэтому такие прослойки позволяют практически полностью избавиться от влияния скинирования, но не снимают магнитного взаимодействия между слоями, что и прослеживается в экспериментах.

На рисунке 8 представлены частотные зависимости магнитной проницаемости многослойных пленок с разным числом слоев (слева) и зависимости параметров ФМР от числа слоев (справа) для многослойных пленок $[200 \text{ нм Fe-N}/200 \text{ нм SiO}_2]_n$ с равными толщинами слоев магнетика и диэлектрика – 200 нм, число слоев $n=1..15$. Как видно, частота резонанса и амплитуда ФМР не изменяются (соответственно, и коэффициент Аше), значит, в магнитных пленках сохраняется оптимальная магнитная структура: плоские домены и планарная магнитная анизотропия. Но при этом заметно растет фактор затухания, в результате чего частота отсечки существенно смещается в область низких частот. Если сравнить с пленками Fe-N равной суммарной толщины (пунктирная кривая на графике $\beta(n)$), то можно увидеть, что рост затухания у них близок, это подтверждает наличие сильной магнитной связи между слоями.

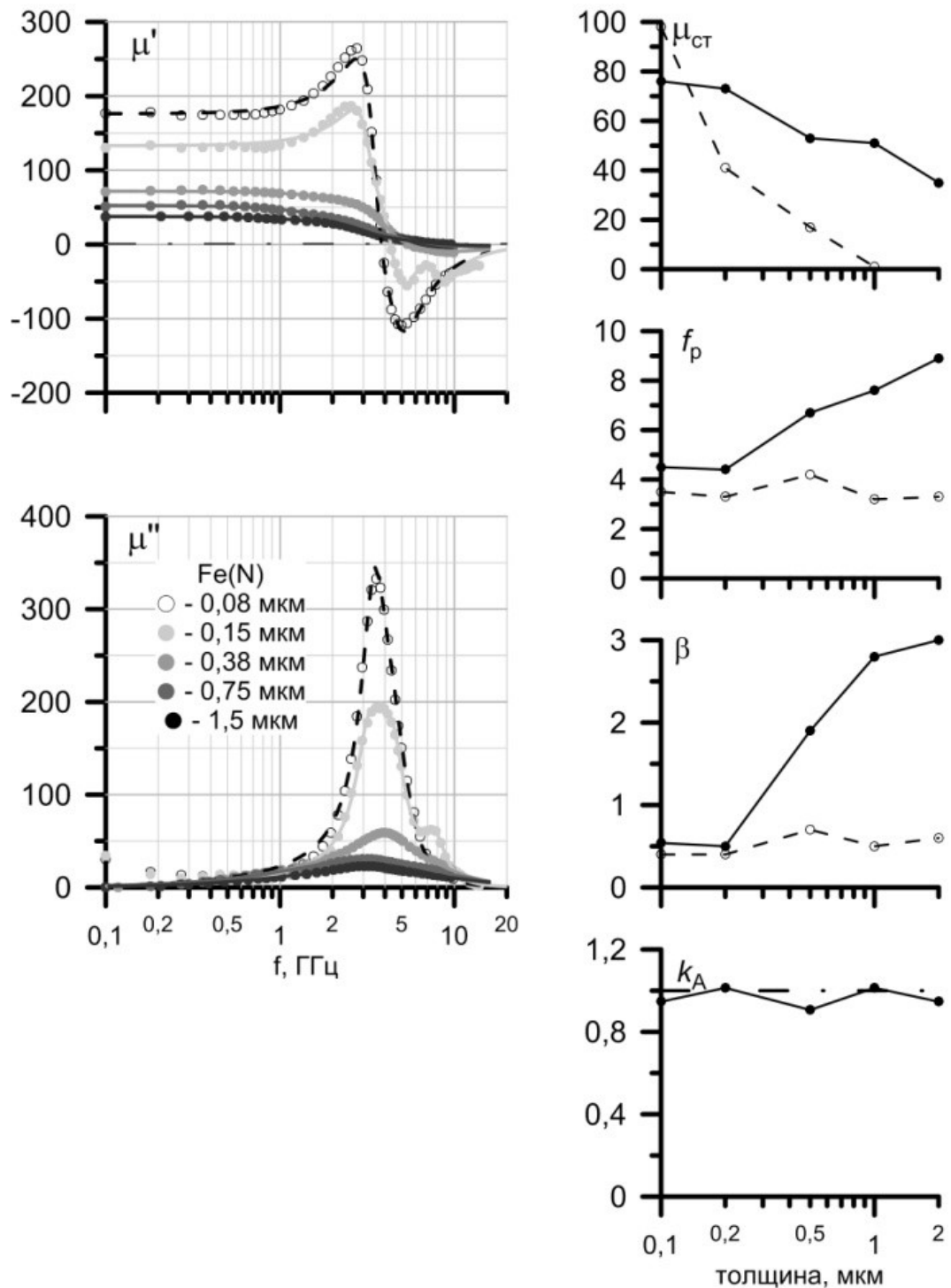


Рисунок 7 – Частотные зависимости собственной магнитной проницаемости пленок Fe-N разной толщины (слева) и зависимость параметров резонанса от толщины (справа)

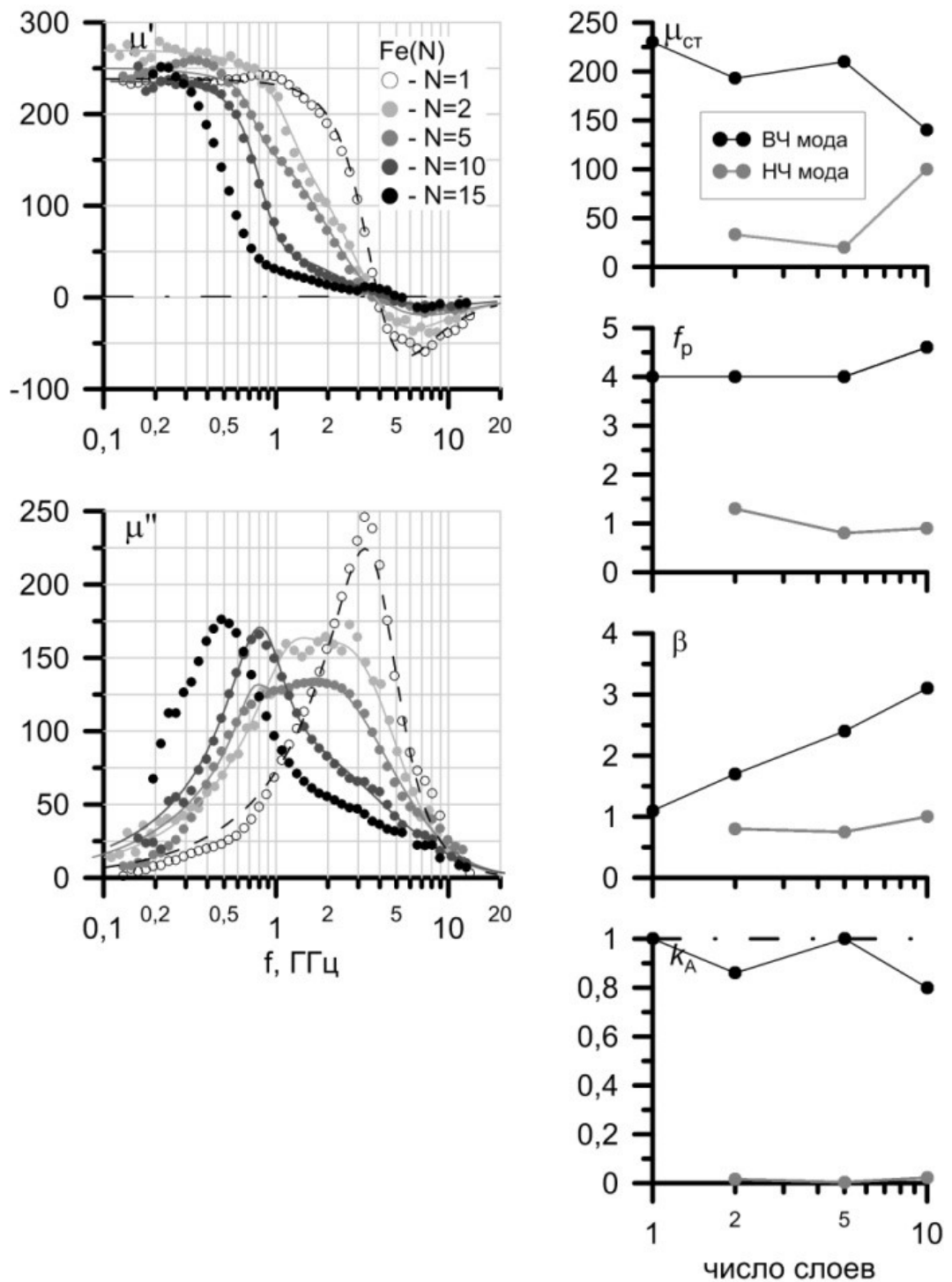


Рисунок 8 – Частотные зависимости магнитной проницаемости пленок Fe-N с разным числом слоев (слева) и зависимость параметров резонанса от числа слоев (справа)

В многослойных пленках пермаллоя $[200 \text{ нм Py}/20 \text{ нм SiO}_2]_n$, $n=1..20$ (рисунок 9), несмотря на снижение толщины прослоек в 10 раз, изменения с ростом числа слоев такие же: планарная магнитная анизотропия сохраняется, фактор затухания растет практически линейно пропорционально числу слоев. Таким образом, в пленках с отрицательным знаком магнитострикции, для которых характерен переход в закритическое состояние с ростом толщины, разделение пленок толщиной ниже толщины перехода в закритическое состояние тонкой диэлектрической прослойкой позволяет, несмотря на сильную магнитную связь между слоями, сохранить продольную магнитную анизотропию в пленке; параметр затухания, к сожалению, сохраняет свой кумулятивный рост с числом слоев.

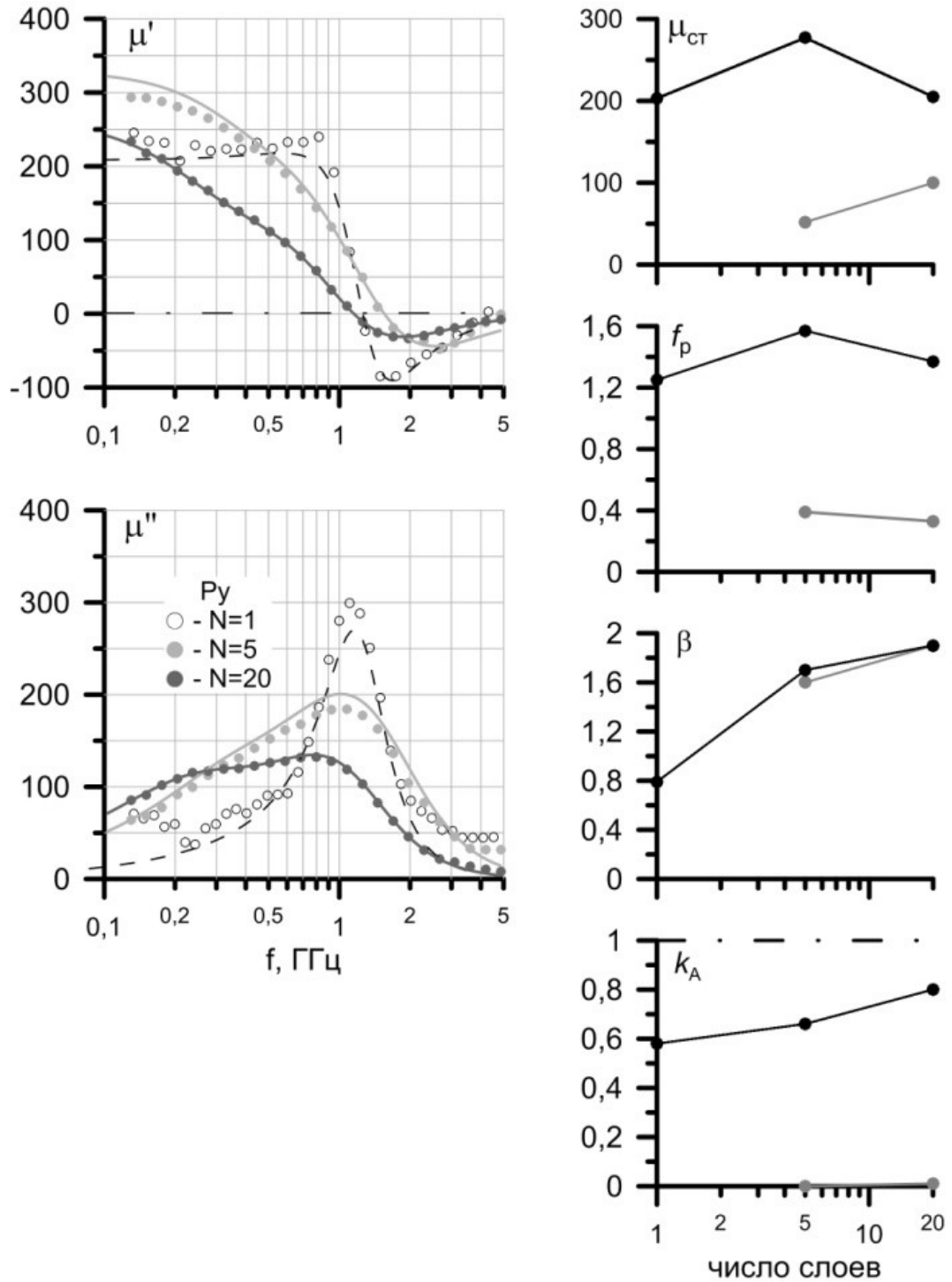


Рисунок 9 – Частотные зависимости магнитной проницаемости пленок Py с разным числом слоев (слева) и зависимость параметров резонанса от числа слоев (справа)

Эффект перехода от однослойных пленок закритической толщины к многослойным пленкам докритической толщины можно увидеть на рисунке 10, где изображены собственные магнитные проницаемости однослойных пленок Py с докритической (0,22 мкм) и закритической (0,44 мкм) толщиной [61]

и многослойной пленки $[250 \text{ нм Py}/30 \text{ нм SiO}_2]_{25}$. Из графика видно, что в многослойной пленке сохраняются амплитуда и частота ФМР однослойной пленкой такой же толщины, но за счет более высокого фактора затухания происходит существенный сдвиг частоты отсечки – практически в 3 раза, с 1,5 до 0,5. Т.о. многослойка дает выигрыш по амплитуде (как минимум 2-кратный, см. рис. 7 и 10), но проигрыш по частоте отсечки.

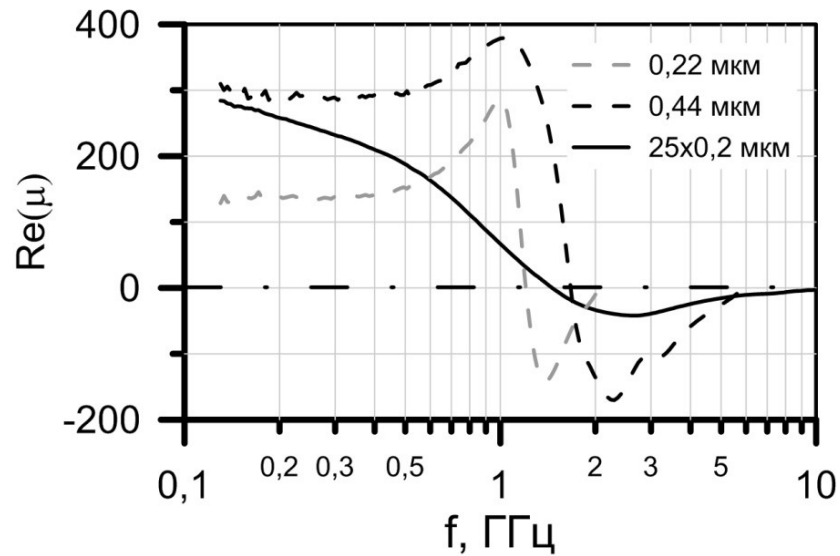


Рисунок 10 – Частотные зависимости действительной части собственной магнитной проницаемости пленок Py: однослойных с толщиной ниже и выше толщины перехода в закритическое состояние (0,22 и 0,44 мкм) и многослойки ($25 \times 0,2$ мкм)

Рисунок 11 демонстрирует еще один пример практического применения многослойных пленок: на рисунке представлены частотные зависимости эффективной магнитной проницаемости ламинатов на основе Py – однослойной пленки толщиной 1,72 мкм и многослойной пленки $[250 \text{ нм Py}/30 \text{ нм SiO}_2]_{25}$. В данном случае получен 3-кратный выигрыш по амплитуде. Плотность такого ламината $\rho = 2,8 \text{ г/см}^3$, объемное содержание магнетика $p_m = 0,23$ (низкая плотность и высокое содержание магнетика также являются преимуществом данного материала).

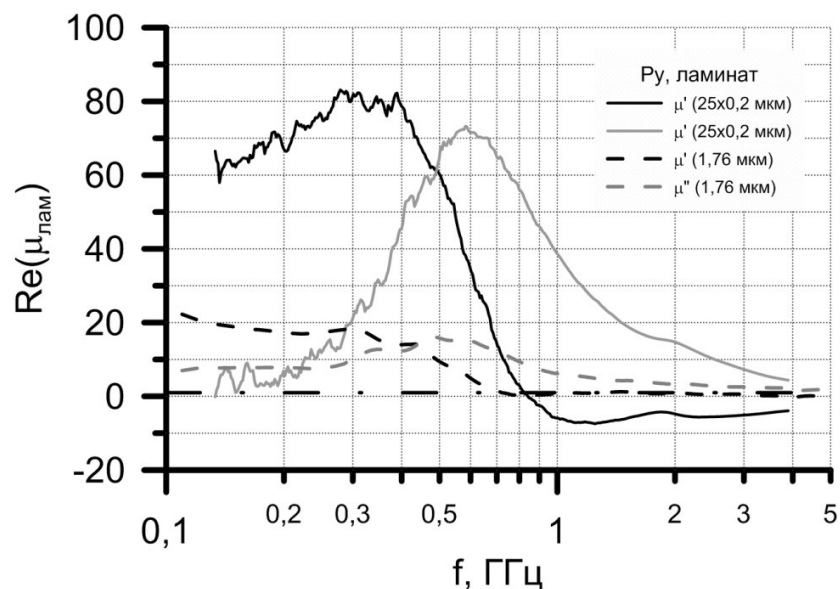


Рисунок 11 – Частотные зависимости магнитной проницаемости ламинатов на основе однослойных и многослойных пленок Py

Можно ли остановить или снизить рост фактора затухания, чтобы повысить число слоев на одной подложке? Одно из возможных решений подсказала геометрия образцов для измерений – в виде скрутки, в которой слои отделены друг от друга подложкой толщиной 10-20 мкм: такой слой обеспечивает искомое магнитное разделение, минимизируя потери. Соответственно, нужно найти такую

толщину прослойки SiO_2 (назовем ее «разделяющей») в диапазоне от 20 нм до 10 мкм, которая бы обеспечивала необходимый уровень магнитного разделения оптимизированных многослойных пленок.

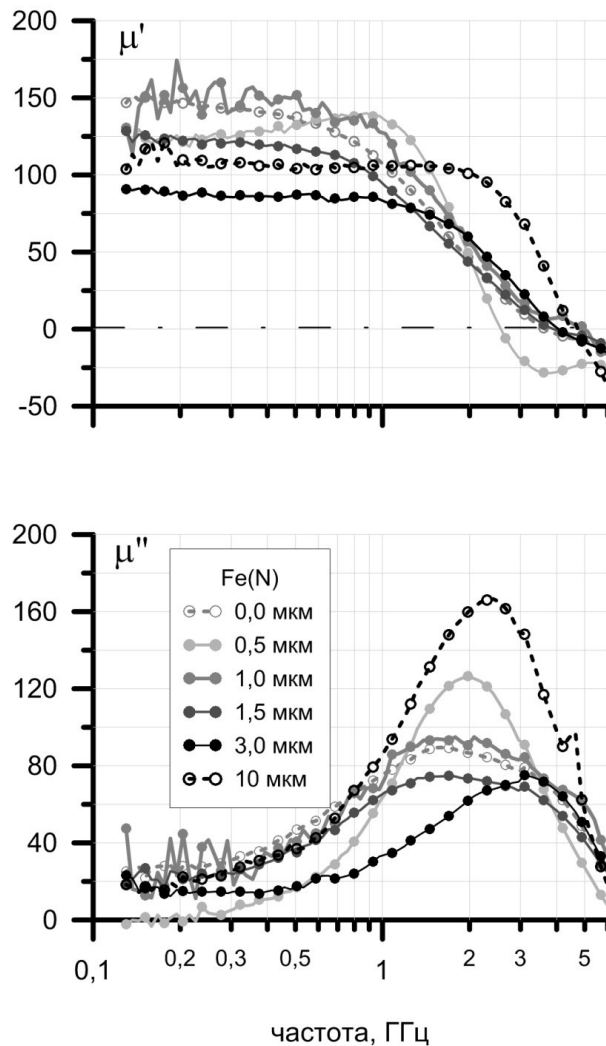


Рисунок 12 – Частотные зависимости собственной магнитной проницаемости магнетика многослоек на основе Fe с разделяющим слоем SiO_2

На рисунке 12 приведены результаты такого эксперимента для Fe: толщина слоя SiO_2 между двумя оптимизированными многослойными пленками $[70 \text{ нм Fe}/30 \text{ нм SiO}_2]_5$ меняется от 0,5 до 3 мкм. Из графика видно, что в данном случае оптимальная толщина разделяющего слоя составляет 0,5 мкм. Дальнейшие эксперименты показали, что в общем случае, в зависимости от магнетика и числа слоев, эта величина варьируется в пределах от 0,5 до 2 мкм. Это практически на порядок меньше толщины подложки и, соответственно, позволяет повысить удельное количество магнитных слоев на подложке и получить тем самым более высокое объемное содержание магнетика в ламинате. В частности, на рисунке 13 представлены частотные зависимости собственной магнитной проницаемости ферромагнетика $\text{Fe}_{60}\text{Co}_{40}$ в многослойных пленках с разным числом оптимизированных по фактору затухания многослойных пленок $[[70 \text{ нм Fe}_{60}\text{Co}_{40}/30 \text{ нм SiO}_2]_{15}/1200 \text{ нм SiO}_2]_m$, где $m = 2..4$, нанесенных с обеих сторон полимерной подложки. Видно, что она в пределах ошибки измерения остается неизменной, что подтверждает эффективность предлагаемого подхода. На следующем графике, рисунке 14, показана эффективная магнитная проницаемость ламината на основе такой многослойной пленки с максимальным числом слоев на обеих сторонах подложки ($m = 4$): суммарная толщина магнетика на одной подложке составляет 8,4 мкм, объемное содержание в ламинате $p_m = 0,25$, что уже сопоставимо с объемным содержанием наполнителя в 3D композитах. Дальнейшее увеличение количества оптимизированных многослоек на одной подложке по такой схеме – через разделяющий слой SiO_2 – упирается в механические свойства такой системы: ввиду значительной суммарной толщины кварцевых слоев пленка становится ломкой, так что с ней становится трудно работать (наматывать на барабан для нанесения со второй стороны подложки, манипулировать при изготовлении объемных образцов).

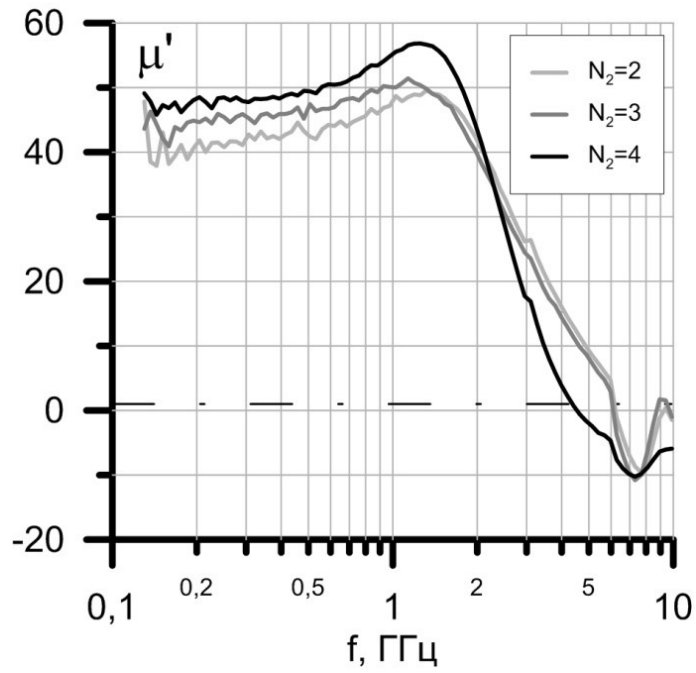


Рисунок 13 – Частотные зависимости собственной магнитной проницаемости магнетика многослоек на основе FeCo с разделяющим слоем SiO_2

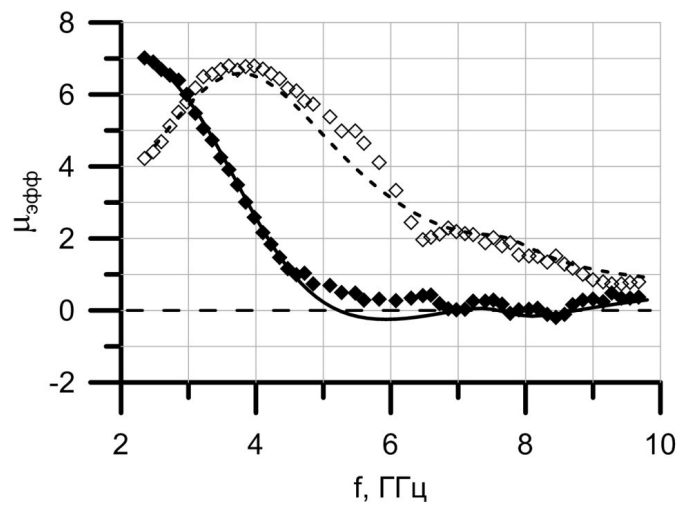


Рисунок 14 – Частотные зависимости эффективной магнитной проницаемости ламинатов на основе многослоек FeCo с разделяющими слоями SiO_2

5. Заключение

В статье рассмотрены теоретические и практические аспекты создания объемных ламинированных магнитных материалов на основе тонких ферромагнитных пленок, нанесенных на полимерную подложку, магнитная проницаемость которых близка к пределу Аше.

Анализ закона Аше (2) показал ряд его существенных особенностей: во-первых, подчиняются закону Аше магнетики с определенной магнитной структурой, отклонение от которой ведет к снижению предельных значений; во-вторых, в (2) пределы наложены на статическую магнитную проницаемость (т.е. низкочастотный предел) и частоту резонанса, тогда как с практической точки зрения актуальны максимальное значение магнитной проницаемости, которое совпадает со статической магнитной проницаемостью, и частота отсечки, которая вследствие высоких значений фактора затухания может быть существенно – в разы – ниже частоты резонанса. В исследованных однослойных магнитных пленках с ростом толщины имеют место оба эффекта – и отклонение от оптимальной магнитной структуры, и рост потерь, что приводит к достаточно сильному ограничению по толщине: предельные толщины ферромагнитных пленок находятся в диапазоне от 20 до 200 нм.

Что касается многослойных пленок, то при нанесении магнитных слоев толщиной ниже предельной они характеризуются, с одной стороны, оптимальной магнитной структурой однослойной пленки, как если бы они росли независимо, с другой, фактором затухания, близким по величине и скорости роста к пленке суммарной толщины, как если бы между ними была сильная связь. Суммарное количество слоев магнетика на подложке, которое и определяет его объемное содержание, ограничивается этим ростом фактора затухания. Частично решить эту проблему можно введением разделяющих слоев SiO_2 , толщина которых много выше толщины прослойки, но много ниже толщины полимерной подложки. Но и эта мера, в свою очередь, наталкивается на ограничение, связанное с критическим снижением механических свойств пленки.

Весь проведенный объем исследований позволил создать образцы ламинированных 2D материалов с высоким объемным содержанием магнетика, близким к объемному содержанию 3D композитов, и уникально высокими значениями магнитной проницаемости в СВЧ диапазоне, близкими к предельным.

Список литературы

- [1] Huitema L., Reveyrand T., Mattei J.-L., Arnaud E., Decroze C., Monediere T. Frequency Tunable Antenna Using a Magneto-Dielectric Material for DVB-H Application // IEEE Trans. Antennas Propagat. — 2013. — Vol. 61. — No. 9. — P. 4456.
- [2] Karilainen A.; Ikonen P. T.; Simovski C.; Tretyakov S. Competing Choosing Dielectric or Magnetic Material to Optimize the Bandwidth of Miniaturized Resonant Antennas // IEEE Trans. Antennas Propagat. — 2011. — Vol. 59. — No. 11 — P. 3991.
- [3] Stergiou C., Eleftheriou E., Zaspalis V. Enhancement of the near-field UHF RFID with ferrite substrates // • IEEE Trans. Mag. — 2012. — Vol. 48. — P. 1497.
- [4] Ramprecht J., Sjoberg D. Biased Magnetic Materials in RAM Applications // Physical Review B. — 2007. — Vol. 75. — P. 85.
- [5] Wu H., Gardner D.S., Xu W., Yu H.B. Integrated RF On-Chip Inductors With Patterned Co-Zr-Ta-B Films // IEEE Trans. Magn. — 2012. — Vol. 48. — P. 4123.
- [6] Yamaguchi M., Baba M., Arai K.I. Sandwich-Type Ferromagnetic RF Integrated Inductor // IEEE Trans. Microw. Theor. Technol. — 2001. — Vol. 49. — No. 12. — P. 2331.
- [7] Seemann K., Leiste H., Bekker V. A New Generation of CMOS-Compatible High Frequency Micro-Inductors with Ferromagnetic Cores: Theory, Fabrication and Characterization // J. Magn. Magn. Mater. — 2006. — Vol. 302. — P. 312.
- [8] Sohn J., Han S.H., Yamaguchi M., Lim S.H. Tunable electromagnetic noise suppressor integrated with a magnetic thin film // Appl. Phys. Lett. — 2006. — Vol. 89. — P. 103501.
- [9] Розанов К. Н., Старостенко С. Н. Влияние дисперсии магнитной проницаемости на широкополосность магнитных радиопоглотителей // Радиотехн. и эл. — 2003. — Т. 48. — № 6. — С. 715.
- [10] Kurlyandskaya G.V., García-Arribas A., Fernández E., Svalov A.V. Nanostructured Magnetoimpedance Multilayers // IEEE Trans. Magn. — 2012. — Vol. 48. — No. 4. — P. 1375.
- [11] Komogortsev S.V., Vazhenina I.G., Kleshnina S.A., Iskhakov R.S., Lepalovskij V.N., Pasyukova A.A., Svalov A.V. Advanced characterization of FeNi-based films for the development of magnetic field sensors

- with tailored functional parameters // *Sensors*. — 2022. — Vol. 22. — No. 9. — P. 3324.
- [12] Koledintseva M.Y., Khilkevich V.V., Razmadze A.G., Gafarov A.G., De S., Drewniak J.L. Evaluation of absorptive properties and permeability of thin sheet magneto-dielectric materials // *IEEE Antennas Propagat. Magn.* — 2012. — Vol. 324. — No. 21. — P. 3389.
- [13] Erkmen F., Chen C., Volakis J.L. UWB Magneto-Dielectric Ground Plane for Low-Profile Antenna Applications // *IEEE Antennas Propagat. Magn.* — 2008. — Vol. 50. — No. 4. — P. 211.
- [14] Acher O. Microwave Magnetic Materials: from Ferrites to Metamaterials // *CLEFS CEA*. — 2007-2008. — No. 56. — P. 19.
- [15] Bresniker K.M., Singhal S., Williams R.S. Adapting to Thrive in a New Economy of Memory Abundance // *IEEE Computer* — 2015. — Vol. 48. — No. 12. — P. 44.
- [16] Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов по спец. «Электронные приборы и устройства» // М.: Высш. шк. — 1990.
- [17] Rozanov K.N. Ultimate Thickness to Bandwidth Ratio of Radar Absorbers // *IEEE Trans. on Antenn. and Propag.* — 2000. — Vol. 48. — No. 8. — P. 1230.
- [18] Perrin G., Acher O., Peuzin J.C., Vucadinovich N. Variations of the anisotropy energy versus sputtering gas pressure in ferromagnetic thin films: A magneto-elastic effect // *J. Magn. Magn. Mater.* — 1996. — Vol. 157/158. — P. 289.
- [19] Walser R.M., Win W., Valanju P.M. Shape-optimized ferromagnetic particles with maximum theoretical microwave susceptibility // *IEEE Trans. Magn.* — 1998. — Vol. 34. — No. 4. — P. 1390.
- [20] Adenot A.L., Acher O., Taffary T., Longuet L. Sum rules on the dynamic permeability of hexagonal ferrites // *J. Appl. Phys.* — 2002. — Vol. 91. — P. 7601.
- [21] Torrejon J., Adenot-Engelvin A.-L., Bertin F., Dubuget V., Acher O., Vazquez M. Sum rules and figures-of-merit on the microwave permeability of nanocrystalline microwires // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2009. — Vol. 321. — No. 10. — P. 1227.
- [22] Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Osipov A.V., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Starostenko S.N. Microwave permeability of laminates with thin Fe-based films // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2004. — Vol. 272-276. — P. 2208.
- [23] Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Osipov A.V., Petrov D.A., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A. Laminates of multi-layered Fe films for microwave applications // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2007. — Vol. 315. — No. 2. — P. e813.
- [24] Лагарьков А.Н., Маклаков С.А., Осипов А.В., Петров Д.А., Розанов К.Н., Рыжиков И.А., Седова М.В., Старостенко С.Н., Якубов И.Т. Свойства слоистых структур на основе тонких ферромагнитных пленок // *Радиотехника и электроника* — 2009. — Т. 54. — № 5. — С. 625.
- [25] Lagarkov A.N., Rozanov K.N. High-frequency behavior of magnetic composites // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2009. — Vol. 321. — No. 14. — P. 2082.
- [26] Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Osipov A.V., Maklakov S.A., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Starostenko S. N. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies // *AIP Advances*. — 2014. — Vol. 4. — No. 10. — P. 107143.
- [27] Bobrovskii S.Y., Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Maklakov S.S., Osipov A.V., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Petrov D.A., Zezyulina P.A.. Variation of Microwave Magnetic Properties for Thin Films of Ferromagnetic Metals with the Film Thickness // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2018. — Vol. 459. — P. 20.
- [28] Acher O., S. Dubourg. Generalization of Snoek's law to ferromagnetic films and composites // *Phys. Rev. B*. — 2008. — Vol. 77. — P. 104440.
- [29] Rozanov K.N., Koledintseva M.Y., Yelsukov E.P. A laminate of ferromagnetic films with high effective permeability at high frequencies // *Composites and Their Properties*, Edited by Ning Hu, InTech. — 2012. — P. 331.
- [30] Bobrovskii S.Y., Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Osipov A.V., Rozanov K.N. Adjustable Microwave Magnetic Spectra of Metamaterials Based on Ferromagnetic Film Laminate // *IEEE Trans. Magn.* — 2017. — Vol. 53. — No. 10. — P. 2800906.
- [31] Buznikov N.A., Rakhmanov A.L., Rozanov K.N. The effect of stripe domain structure on dynamic permeability of thin ferromagnetic films with out-of-plane uniaxial anisotropy // *IEEE Trans. Magn.* —

2002. — Vol. 38. — No. 5. — P. 3123.
- [32] Buznikov N.A., Rozanov K.N., Maklakov S.A., Maklakov S.S., Osipov A.V., Rozanov K.N., Ryzhikov I.A., Petrov D.A., Zezyulina P.A. The effect of stripe domain structure on dynamic permeability of thin ferromagnetic films with out-of-plane uniaxial anisotropy // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2005. — Vol. 285. — No. 3. — P. 314.
- [33] Зезюлина П.А., Лагарьков А.Н., Маклаков С.А., Осипов А.В., Розанов К.Н., Рыжиков И.А., Старостенко С.Н., Якубов И. Т Ламинированный магнитный материал для высоких частот на основе пермаллоя // II Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады. Москва: ИРЭ РАН. — 2014. — С. 107.
- [34] Jayasekara W.P., Bain J.A., Kryder M.H. High frequency permeability of NiFe and FeAlN // *IEEE Trans. Magn.* — 1998. — Vol. 34. — No. 4. — P. 1438.
- [35] Lagarkov A.N., Iakubov I.T., Ryzhikov I.A., Rozanov K.N., Perov N.S., Elsukov E.P., Maklakov S.A., Osipov A.V., Sedova M.V., Getman A.M., Ul'yanov A.L.. Fe-N films: Morphology, static and dynamic magnetic properties // *Physica B: Condens. Matter.* — 2007. — Vol. 394. — No. 2. — P. 159.
- [36] Maklakov S.S., Maklakov S.A., Ryzhikov I.A., Rozanov K.N., Osipov A.V. Thin Co films with tunable ferromagnetic resonance frequency // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2012. — Vol. 324. — No. 13. — P. 2108.
- [37] Wang S.X., Sun N.X., Yamaguchi M., Yabukami S. Properties of a new soft magnetic material // *Nature.* — 2000. — Vol. 407. — P. 150.
- [38] Liu L., Kong L.B., Lin G. Q., Matitsine S., Deng C.R. Microwave Permeability of Ferromagnetic Microwires Composites/Metamaterials and Potential Applications // *IEEE Trans. Magn.* — 2008. — Vol. 44. — P. 3119.
- [39] Queste S., Damiani D., Guillet F., Acher O., Soret J.C. Dynamic permeability of ferromagnetic thin films deposited on moving substrate by magnetron sputtering // *Annual Meeting on Health, Sci. and Technol.*, 20–21 May 2003, Tours, France. — 2003. — P. 3.
- [40] Queste S., Dubourg S., Acher O., Barholz K.U., Mattheis R.. Exchange bias anisotropy on the dynamic permeability of thin NiFe layers // *J. Appl. Phys.* — 2004. — Vol. 95. — P. 6873.
- [41] Acher O., Queste S., Barholz K.-U., Mattheis R. High-frequency permeability of thin NiFe/IrMn layers // *J. Appl. Phys.* — 2003. — Vol. 93. — P. 6668.
- [42] Youssef J.B., Vukadinovic N., Billet D., Labrune M. Thickness-Dependent Magnetic Excitations in Permalloy Films with Nonuniform Magnetization // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 69. — P. 174402.
- [43] Riet van de E., Roozeboom F. Ferromagnetic resonance and eddy currents in high-permeable thin films // *J. Appl. Phys.* — 1997. — Vol. 81. — P. 350.
- [44] Walser R.M., Hach R.J. // Patent US 350047. — 1970-11-10.
- [45] Walser R.M., Valanju A. P. GHz ferromagnetic resonances in laminated microscale objects (abstract) // *J. Appl. Phys.* — 1997. — Vol. 81. — P. 5169.
- [46] Acher O., Jacquart P.M., Fontaine J.M., Baclet P., Perrin G. High impedance anisotropic composites manufactured from ferromagnetic thin films for microwave applications // *IEEE Trans.* — 1994. — Vol. MAG-30. — No. 6. — P. 4533.
- [47] Acher O., Adenot A.L., Lubrano F., Duverger F. Low density artificial microwave magnetic composites // *J. Appl. Phys.* — 1999. — Vol. 85. — No. 8. — P. 4639.
- [48] Martina J.I., Nogues J., Liuc K., Vicent J.L., Schuller I.K. Ordered magnetic nanostructures: fabrication and properties // *J. Magn. Magn. Mater.* — 2003. — Vol. 256. —P. 449.
- [49] Miltenberger B., Sajer J.-M. // Patent EP 0308334. — 1989-03-22.
- [50] Fontaine J.-M., Varoquaux A. // Patent WO 9108577. — 1991-06-13.
- [51] Kumurdjian P. // Patent FR 2655997. — 1991-06-21.
- [52] Hubbard R.N., Duhl M.L. // Patent US 6033782. — 2000-03-07.
- [53] Ramprasad R., Zurcher P., Petras M., Miller M., Renaud P. Fundamental Limits of Soft Magnetic Particle Composites for High Frequency Applications // *Phys. Stat. Sol. (b).* — 2002. — Vol. 233. —No. 1 — P. 31.
- [54] Sugita Y., Fujiwara H., Sato T. Critical Thickness and Perpendicular Anisotropy of Evaporated Permalloy Films with Stripe Domains // *Appl. Phys. Lett.* — 1967. — Vol. 10. —No. 8 — P. 229.

- [55] Svalov A.V., Aseginolaz I.R., Garcia-Arribas A., Orue I., Barandiaran J.M., Alonso J., Kurlyandskaya G.V. Structure and Magnetic Properties of Thin Permalloy Films Near the “Transcritical” State // IEEE Trans. Magn. — 2010. — Vol. 46. — No. 2 — P. 333.
- [56] Сорокин А.Н., Свалов А.В., Васильковский В.О., Савин П.А., Курляндская Г.В. // Patent RU 2572921 (C2). — 20.01.2016
- [57] Бузников Н.А., Свалов А.В., Курляндская Г.В. Влияние параметров многослойных пленочных структур на основе пермаллоя на чувствительность эффекта магнитного импеданса // Физика металлов и металловедение. — 2021. — Т. 122. — № 3 — P. 241.
- [58] Розанов К.Н., Симонов Н.А., Осипов А.В. Измерение СВЧ магнитной проницаемости пленок // Радиотехника и электроника — 2002. — Т. 47. — № 2. — С. 210.
- [59] Rozanov K.N., Koledintseva M.Y. Application of generalized Snoek’s law over a finite frequency range: A case study // J. Appl. Phys. — 2016. — Vol. 119. — 073901.
- [60] Осипов А.В., Маклаков С.А., Маклаков С.С., Розанов К.Н., Ширяев А.О. Учет влияния скин-эффекта на СВЧ магнитную проницаемость // Тезисы Двадцатой четвертой ежегодной научной конференции ИТПЭ РАН, 15 – 19 мая 2023 года. - С. 31.
- [61] Zezulina P.A., Iakubov I.T., Lagarkov A.N., Maklakov S.A., Maklakov S.S., Naboko A.S., Osipov A.V., Petrov D.A., Rozanov K.N. The effect of the perpendicular anisotropy and eddy currents on the microwave performance of single-layer and multi-layer permalloy films // IEEE Mag. Let. — 2016. — Vol. 7. — 3705804.
- [62] H.P.J. Wijn (Ed.). Magnetic Properties of Metals: D-elements, Alloys, and Compounds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 1991.
- [63] Лагарьков А.Н., Кашуркин О.Ю., Маклаков С.А., Осипов А.В., Розанов К.Н., Рыжиков И.А., Старостенко С.Н., Якубов И.Т. Влияние магнитоупругого эффекта на СВЧ магнитные свойства тонких пленок Fe-N // Радиотехника и электроника. — 2012. — Т. 57. — № 4. — С. 441.

LAMINATED NANOMATERIALS FOR MICROWAVES: FEATURES AND LIMITATIONS

A.V Osipov^{*1}, S.Yu. Bobrovsky¹, P.A. Zezulina¹, A.N. Lagarkov¹, S.A. Maklakov¹,
S.S. Maklakov¹, D.A. Petrov¹, K.N. Rozanov¹, I.A. Ryzhikov¹, A.O. Shiryaev¹

¹ Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

* avosipov@mail.ru

Abstract

Many problems of microwave technology needs bulk materials with the highest possible values of permeability at microwaves. It is known that these values are achievable with use of thin ferromagnetic films. The article presents an overview of the results obtained during the development of a new type of composite materials - laminates of multilayer thin ferromagnetic films deposited onto a polymer substrate; theoretical assessments of their application and limitations found under study are considered, the current state of affairs and development prospects are assessed.

Key words: microwave measurements, magnetic materials, thin films, microwave permeability, ferromagnetic resonance