

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПЕРМАЛЛОЯ МЕТОДОМ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

В последнее время наблюдается рост интереса к изучению сверхвысокочастотных свойств магнитных наноструктур, в частности тонких магнитных пленок с толщинами от нескольких десятков до нескольких единиц нанометров. Известно, что такие пленки являются перспективными для СВЧ-техники, сферы телекоммуникаций. Использование их в оптоволоконных системах, например в фильтрах оптического диапазона, даст возможность управлять спектром пропускания этих фильтров с помощью магнитного поля. Поэтому изучение магнитных свойств тонких пленок является актуальной задачей.

Одним из методов изучения магнитных свойств тонких пленок является ферромагнитный резонанс (ФМР), как один из самых чувствительных методов в диагностике низкоразмерных магнитных структур, в частности в изучении их типа магнетизма, характера поглощения сверхвысокочастотных полей, намагниченности. Отметим, что такими исследованиями, в том числе и анализом, намагниченности насыщения тонкопленочных магнетиков занимаются давно (напр., [1]). С точки зрения фундаментальной науки, низкоразмерные структуры интересны тем, что их магнитные свойства очень отличаются от магнитных свойств объемных структур, поскольку становится существенным влияние приповерхностных спинов на спины внутри магнетика.

Например, в работах [2, 3] описаны исследования эффективной намагниченности насыщения тонких пленок с анизотропией в плоскости образца и влиянием подложки. В работе [4] рассматривается эффективная намагниченность насыщения изотропных в плоскости тонких пленок пермаллоя с толщинами от 30 до 360 нм на подложке кремния и показано постепенное уменьшение эффективной намагниченности насыщения с уменьшением толщины пленки. Однако сейчас больший интерес представляет исследование изотропных в плоскости пленок меньшей толщины.

Цель работы – исследование свойств магнитных пленок пермаллоя с толщинами от 2 нм до 100 нм методом ФМР в гигагерцовом диапазоне частот, а именно: анализ зависимости эффективной намагниченности насыщения от толщины пленки пермаллоя; определение характера зависимости ферромагнитного резонанса от величины резонансного магнитного поля.

Краткие теоретические сведения

Как известно, спектр ферромагнитного резонанса коллинеарного магнетика [5] зависит от анизотропии его формы, приводящей к возникновению полей поверхностной анизотропии. Поэтому, для извлечения из экспериментальных данных значения намагниченности необходимо провести оценку влияния таких полей на исследуемый образец заданной формы. В [5] показано, что магнетик, представляющий собой плоскую пластину, можно приближенно рассматривать как малый эллипсоид с осями a , b и c при условии $b \ll c \ll a$. Размагничивающие факторы такого малого эллипсоида N_x , N_y и N_z можно записать в виде

$$N_x = \frac{abc}{2} \int_0^\alpha \frac{ds}{(s+a^2)R_s}, \quad N_y = \frac{abc}{2} \int_0^\alpha \frac{ds}{(s+b^2)R_s}, \quad N_z = \frac{abc}{2} \int_0^\alpha \frac{ds}{(s+c^2)R_s} \quad (1a)$$

причем, соотношения между размагничивающими полями и размагничивающими факторами записывается в виде

$$H_x = h - N_x M_{Sx}, \quad H_y = -N_y M_{Sy}, \quad H_z = H_0 - N_z M_{Sz} \quad (1б)$$

где $R_s = \sqrt{(s+a^2)(s+b^2)(s+c^2)}$, h – H -компонента электромагнитного поля; H_0 – внешнее постоянное магнитное поле; M_s – намагниченность насыщения.

Подставив (1а) в уравнение Ландау – Лифшица, которое является уравнением движения для спинов электронов в коллинеарном магнетике и устанавливает связь между значениями частоты ω_r и магнитным полем H_r в условиях ферромагнитного резонанса, через уравнения (1б), можно получить выражение, известное как уравнение Киттеля [6]:

$$\omega_r^2 = \left(\frac{g\mu_B}{\hbar} \right)^2 [H_r + H_K + (N_x - N_z)M_s][H_r + H_K + (N_y - N_z)M_s], \quad (2)$$

где ω_r – резонансная частота; H_r – резонансное магнитное поле, g – фактор Ланде, μ_B – магнетон Бора, \hbar – постоянная Планка; $H_K = 2K_1/M_s$ – поле кристаллографической анизотропии с константой анизотропии K_1 .

Вычисленные по (1а) значения размагничивающих факторов для изучаемых пленок с толщинами 2 – 100 нм представлены на рис. 1.

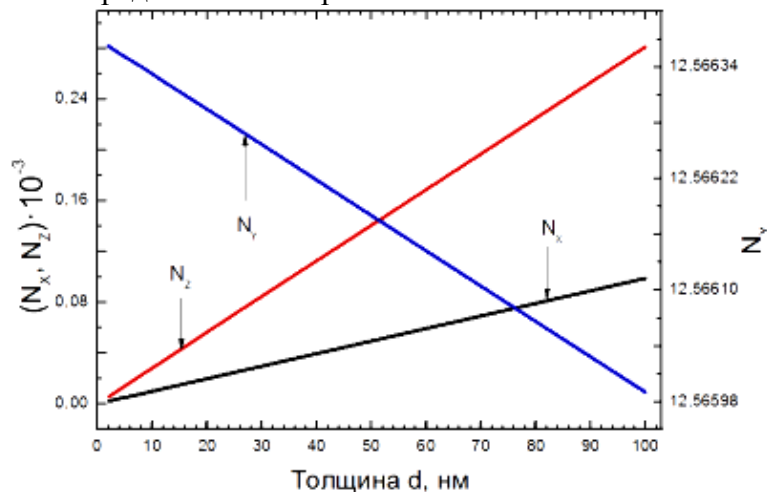


Рис. 1. Зависимость значений размагничивающих факторов N_x , N_y и N_z от толщины пластины d

Из рис. 1 видно, что значения размагничивающих факторов при толщинах пленок от 2 до 100 нм изменяются незначительно и вклад в резонансную частоту составит всего 1/100 %. Поэтому значения размагничивающих факторов можно считать константами вида [6]: $N_x=N_z=0$, $N_y=4\pi$. Тогда, с учетом поля поверхностной анизотропии, формулу (2) можно переписать в виде

$$\omega_r^2 = \left(\frac{g\mu_B}{\hbar} \right)^2 [H_r + H_K][H_r + H_K + 4\pi M_{eff}], \quad (3)$$

где M_{eff} – эффективная намагниченность насыщения, определяемая как [2]:

$$M_{eff} = M_s - \frac{2K_s}{M_s d}, \quad (4)$$

в которой d – толщина пластины и $2K_s/M_s d$ – поле поверхностной анизотропии; K_s – константа поверхностной анизотропии.

Нетрудно убедиться, что с ростом толщины пленки значения размагничивающих факторов значительно изменяются. Их вклад в резонансную частоту начинает превышать 1 %, когда толщина пленки становится больше 1 мкм (для значений длины и ширины пленки в

единицы миллиметров). В этом случае значения размагничивающих факторов необходимо учитывать – формула (2). Значение поля поверхностной анизотропии, наоборот: при толщинах 1 $\mu\text{м}$ и более изменяется пренебрежимо мало, и его можно учитывать в виде константы. Однако при толщинах менее 1 $\mu\text{м}$ поле поверхностной анизотропии начинает существенно влиять на резонансную частоту с изменением толщины, поэтому ее учет обязателен – формула (3).

Эксперимент и обсуждение результатов

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне частот 8 – 12 ГГц с использованием VNA магниторезонансного спектрометра, построенного на основе векторного анализатора цепей Agilent N5230A, и оригинального СВЧ-модуля, включающего в себя перестраиваемый прямоугольный резонатор. Образец располагали таким образом, чтобы постоянное магнитное поле было ориентировано вдоль плоскости образца ($H_r \perp a$, $H_r \perp b$ и $H_r \parallel c$), а h -компонента СВЧ поля также лежала в этой плоскости (вдоль оси a), перпендикулярно постоянному полю, обеспечивая тем самым выполнение условия ФМР. Регистрацию спектров ФМР (рис.2) осуществляли в режиме сканирования постоянного магнитного поля. Линия ФМР для разных ω_r зарегистрирована на каждом спектре в виде провала (пика), при некотором резонансном значении H_r . Изменение ω_r приводит к изменению H_r , как показано на рис. 2.

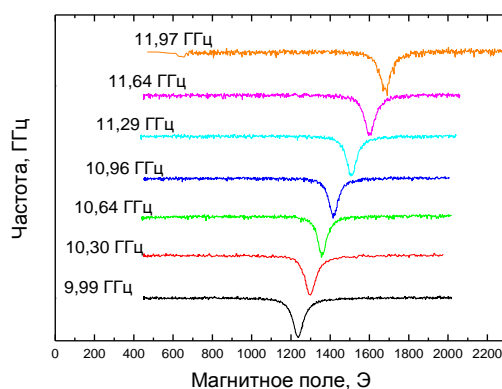


Рис. 2. Спектры ферромагнитного резонанса пленки пермаллоя толщиной 25 нм

Экспериментальные данные $\omega_r = \omega_r(H_r)$ для нанопленок с толщинами от 2 до 100 нм аппроксимированы формулой (3) и приведены на рис. 3.

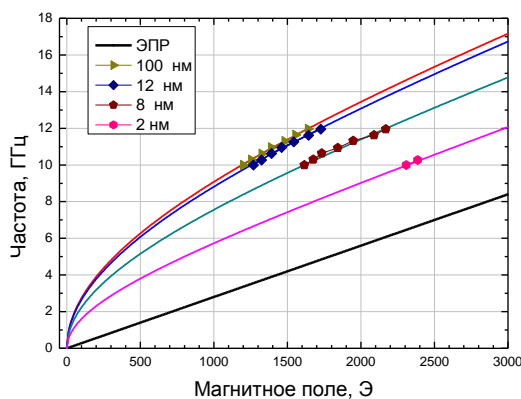


Рис.3. Резонансная частотно-полевая зависимость для нанопленок пермаллоя; сплошные линии – аппроксимации формулой (3)

Из рис. 3 видно, что при одинаковой частоте с уменьшением толщины нанопленки резонансное магнитное поле увеличивается. Это значит, что уменьшается эффективная намагниченность насыщения M_{eff} пленки. Вычисленные значения M_{eff} , для нанопленок пермаллоя разной толщины приведены в таблице:

d , нм	2	4	8	12	25	50	100
M_{eff} , Гс	236	259	479	665	690	703	715

а их зависимости от толщины – на рис. 4.

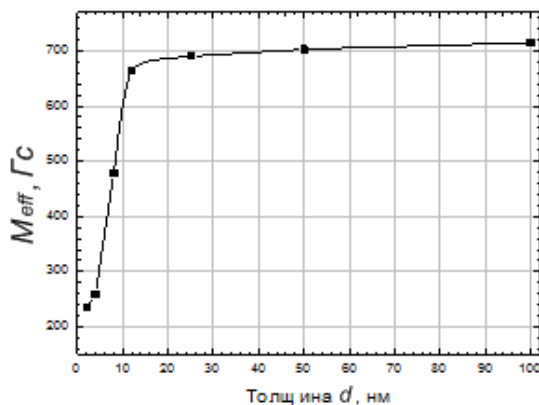


Рис.4. Зависимость эффективной намагниченности насыщения от толщины нанопленки пермаллоя

Видно, что с уменьшением толщины d нанопленки существенное падение M_{eff} наблюдается при $d < (12 - 25)$ нм и продолжается до минимальной толщины нанопленки, где d образца не превышает 5-6 атомарных слоев. Такой сценарий поведения $M_{eff}(d)$ свидетельствует о том, что с точки зрения электродинамики микроволнового диапазона пермаллой с толщинами $d > 25$ нм должен рассматриваться как объемная магнитная структура. Для толщины $d < \ll 12$ нм, наноструктурой, в которой вклад спинов электронов в атомах, находящихся на поверхности, в эффективную намагниченность насыщения структуры и в высокочастотное магнито-резонансное поглощение оказывается существенным.

Выводы

Изучены особенности высокочастотного ферромагнитного резонанса в пленках пермаллоя с толщинами от 2 до 100 нм. При этом:

- рассчитана эффективная намагниченность насыщения;
- показано, что при заданных размерах и таких толщинах образцов размагничивающие факторы изменяются незначительно, и поэтому их можно представить в виде константы для случая бесконечно тонкой пластины;
- эффективная намагниченность насыщения M_{eff} резко уменьшается при толщине 12 нм (~30 атомарных слоев) и меньше. Такое поведение M_{eff} связано с полем поверхностной анизотропии, которое при таких толщинах нанопленки вносит наибольший вклад. Это позволяет дать грубую оценку энергии поверхностной анизотропии нанопленки, как энергию взаимодействия половины из этого числа слоев.

Авторы выражают благодарность University of Porto, Rua do Campo Alegre Porto, Portugal Г. Казакею и А. Garcia за предоставленные образцы для исследований.

Список литературы: 1 Суху Р. Ф. Магнитные тонкие пленки. – Москва : Мир, 1967. – 420 с. 2. Chen Yi-C., Hung D.-Sh. Ferromagnetic resonance study of thickness-dependent magnetization precession in Ni80Fe20 films // Journal of applied physics. – 2007. – 101, 09c104 3. Nibarger J. P., Lopusnik R., Celinski Z., Silva T. J. Variation of magnetization and the Lande g factor with thickness in Ni-Fe films. // Applied physics letters. – 2003. – Vol. 83, № 1. – P. 93-95. 4. Daz de Sihués M., Durante-Rincon C. A., Fermin J.R. A ferromagnetic resonance study of NiFe alloy thin films // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2007. – Vol. 316. – P.462-465 5. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред. – М. : Наука, 1982. – Т.8. – 672с. 6. Боровик Е. С., Мильнер А. С. Еременко В. В. Лекции по магнетизму. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1972. – 248 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усикова НАН Украины

Поступила в редколлегию 14.10.2013