

Н.Ю. Григорьева, Р.А. Султанов, Е.Я. Полищук

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Исследование углового распределения и нахождение минимума полной магнитной энергии анизотропного ферромагнитного образца при произвольной ориентации оси анизотропии и внешнего магнитного поля.

Проведено теоретическое исследование зависимости полной магнитной энергии от взаимной ориентации оси магнитной кристаллографической анизотропии и внешнего магнитного поля в тонкопленочных образцах гексаферритов Y-типа и M-типа. Получены уравнения для определения равновесного направления намагниченности. Проведен анализ угловых зависимостей полной магнитной энергии пленочного образца гексаферрита при заданной величине и ориентации внешнего магнитного поля и поля одноосной магнитной кристаллографической анизотропии. Исследовано изменение величины и направления внутреннего эффективного статического магнитного поля от внешнего магнитного поля, для двух типов одноосной магнитной кристаллографической анизотропии типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость».

Ключевые слова: гексаферрит, одноосная магнитная кристаллографическая анизотропия, эффективное внутреннее поле, гибридные электромагнитно-спиновые волны.

Сильно анизотропные магнитные материалы активно исследуются с 50-х годов XX века, в связи с перспективностью их применения в спин-волновой микро- и наноэлектронике. В последние годы интерес к данному классу материалов связан с появившейся потребностью обработки сигналов субтерагерцового диапазона частот [1-3]. Современные технологии позволили получить эпитаксиальные пленки гексагональных ферритов со сравнительно небольшой шириной линии ферромагнитного резонанса, что, в свою очередь, дает возможность использовать их в интегральных СВЧ устройствах миллиметрового диапазона.

Известно, что наличие сильной магнитной кристаллографической анизотропии в тонкопленочных ферромагнитных образцах коренным образом меняет спектр спиновых волн. Из-за наличия анизотропии вектор намагниченности кристалла оказывается связанным с определенными направлениями, так называемыми направлениями легкого намагничивания, и для поворота его из этих направлений необходима затрата энергии – энергии анизотропии. Для сильно анизотропных пленок, когда внешнее магнитное поле H_0 приложено вдоль трудного направления намагничивания, равновесная намагниченность только в незначительной степени поворачивается к внешнему полю, оставаясь ориентированной вблизи легкой оси, поскольку H_0 мало по сравнению с H_U . Обычно в таких пленках ферромагнитный резонанс наблюдается при более высоких частотах. Наличие сильной магнитной кристаллографической анизотропии позволяет

повысить рабочие частоты СВЧ устройств до ~50-100 GHz при сравнительно небольших магнитных полях смещения.

Одноосная анизотропия характеризуется осью симметрии, соответствующей либо максимуму, либо минимуму энергии. Если на соответствующей оси достигается максимум энергии, то говорят, что это ось трудного намагничивания (или анизотропия типа «легкая плоскость»). Если же оси симметрии соответствует минимум энергии, то ее называют осью легкого намагничивания (или анизотропией типа «легкая ось»).

В данной работе теоретически исследованы тонкопленочные образцы сильно анизотропных ферромагнетиков магнитной кристаллографической анизотропией типа «легкая ось» и типа «легкая плоскость». Рассмотрен наиболее общий случай произвольного направления внешнего магнитного поля и оси одноосной магнитной кристаллографической анизотропии относительно плоскости образца. Напряженность внешнего магнитного поля считается достаточной для однородного (однодоменного) намагничивания образца.

Равновесное направление статической намагниченности M_0 в анизотропной ферромагнитной пленке находится из условия минимума плотности свободной магнитной энергии образца U_{mag} [4]. Для рассматриваемого случая плотность свободной магнитной энергии имеет вид $U_{mag} = U_H + U_M + U_U$. В данной работе составляющие магнитной энергии записываются в полярной системе координат. Полученная система уравнений для нахождения минимума плотности свободной магнитной энергии образца решалась численными методами. Были найдены зависимости равновесных углов θ и φ , задающих направление равновесной намагниченности, от величины и направления внешнего магнитного поля. Направление внешнего магнитного поля H_0 задавалось углами θ_H , φ_H . А поле магнитной кристаллографической анизотропии H_U определялась углами θ_U и φ_U . Все углы θ отсчитывались от нормали к плоскости пленки, а углы φ – от направления распространения спиновой волны.

Предполагалось, что направление эффективного статического магнитного поля H^S совпадает с направлением равновесной намагниченности M^S и его величина зависит от найденных равновесных углов следующим образом:

$$H^S = H_0 (\cos\theta_H \cos\theta + \sin\theta_H \sin\theta \cos(\varphi_H - \varphi)) - 4\pi M_0 \cos^2\theta - 4\pi M_0 N_{zz}^U$$

В данной работе проведен анализ зависимости равновесного угла и эффективного статического магнитного поля от величины внешнего поля смещения при его повороте в различных плоскостях, а так же при различных направлениях поля магнитной кристаллографической анизотропии. На рис. 1 приведены результаты расчетов равновесного угла φ и эффективного статического магнитного поля H^S от величины внешнего поля смещения H_0 в случае, когда ось легко намагничивания перпендикулярна плоскости пленки $\varphi_U = \theta_U = 0^\circ$, а вектор внешнего магнитного поля лежит в плоскости образца (то есть $\varphi_H = 0^\circ$). Параметры материала $4\pi M_0 = 4800$ Гс, $H_U = 16800$ Э.

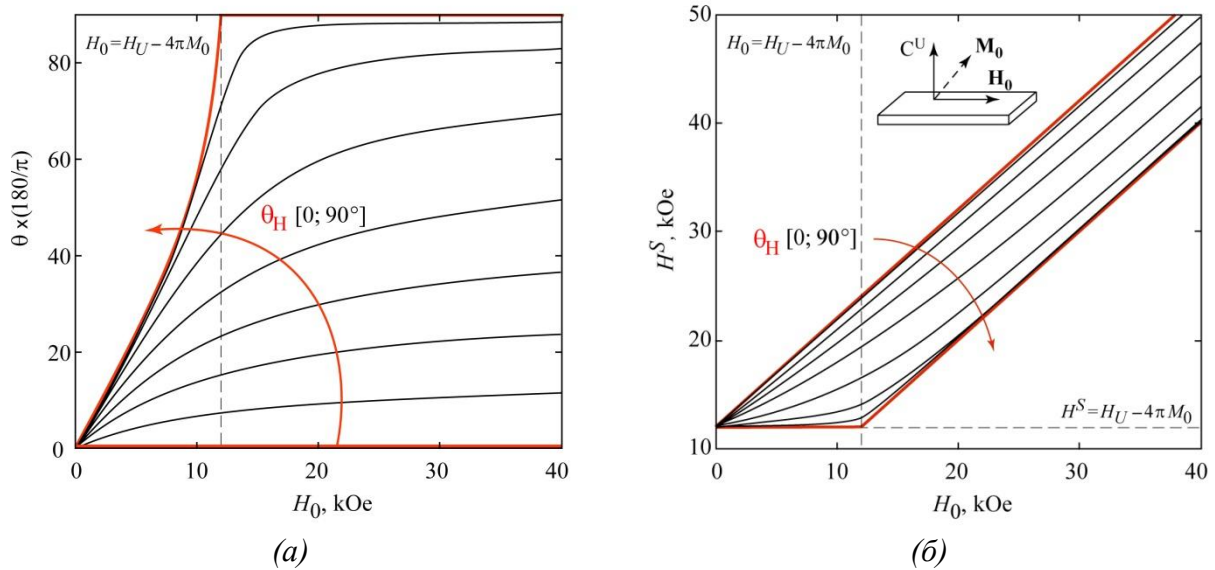


Рис. 1

На рис. 2 представлены угловые зависимости полной внутренней энергии пленочных гексаферритов с анизотропией типа «легкая ось» (рис. 2(а) (б)) и типа «легкая плоскость» (рис. 2(в), (г)).

Было проведено полное исследование зависимости углового распределения внутренней магнитной энергии образца от величины и взаимной ориентации внешнего магнитного поля смещения и поля одноосной магнитной кристаллографической анизотропии. На рис. 2 представлены только некоторые из них.

Расчеты показали, что в образцах с одноосной магнитной кристаллографической анизотропией существуют взаимные ориентации внешнего магнитного поля и поля одноосной кристаллографической анизотропии, при которых наблюдается более одного абсолютного минимума плотности полной магнитной энергии. Например, в случае, когда внешнее магнитное поле приложено в плоскости пленки ($\theta = 90^\circ$), а ось легкого намагничивания перпендикулярна плоскости пленки.

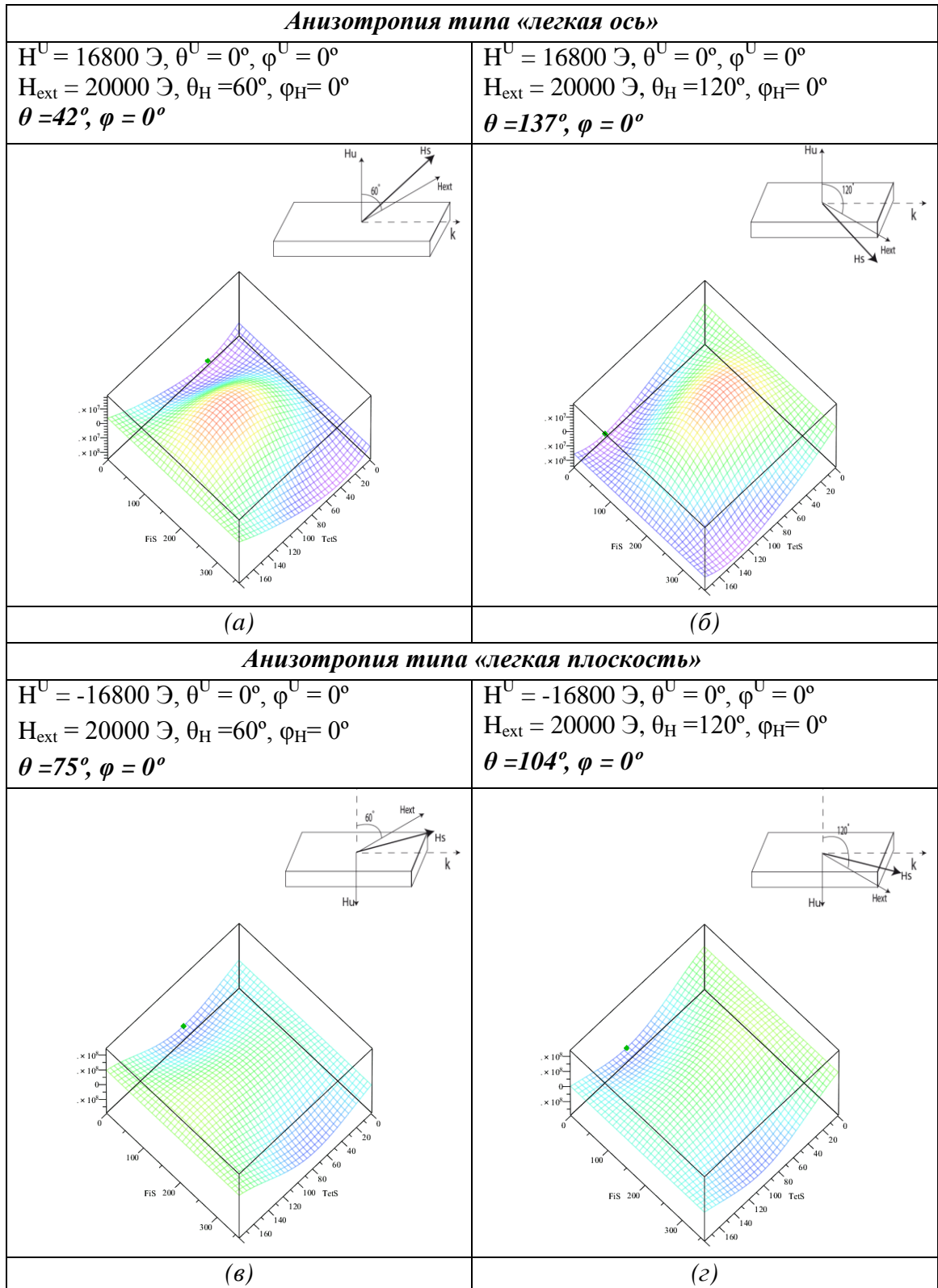


Рис. 2

Полученные в данной работе результаты могут быть полезны при построении спектров дипольно-обменных и гибридных электромагнитно-спиновых волн в

произвольно намагниченных слоистых мультиферроидных структурах, содержащих пленки сильно анизотропных ферромагнетиков с одноосной магнитной кристаллографической анизотропией, а также при оценке влияния ростовой анизотропии в изотропных ферромагнитных пленках.

Библиографический список

1. Popov M.A. Simultaneous observation of magnetostatic backward volume waves and waves in single crystal barium ferrite platelets with inplane easy axis / M. A. Popov, I. V. Zavislyak, and G. Srinivasan // – Journal of applied physics. – 2012. – Vol. 111– pp. p. 023901-1-7
2. Ustinov A.B. Al substituted Ba-hexaferrite single-crystal films for millimeter-wave devices / A.B. Ustinov, A.S. Tatarenko, G.Srinivasan and A. M. Balbashov// – Journal of applied physics. – 2009. – Vol. 105. – p. 023908-1-4.
3. Grigoryeva N. Yu. Dual-tunable hybrid wave hexaferrite–ferroelectric millimetre-wave phase shifter / N. Yu. Grigoryeva, R. A. Sultanov, B. A. Kalinikos // – Electronics Letters. – 2011. – Vol. 47. – №1. – pp. 35 - 36.
4. Беляков С.В.. Дисперсия дипольно-обменных спиновых волн в анизотропных монокристаллических магнитных пленках / С.В. Беляков, Б.А. Калиникос, Н.В. Кожусь // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1988 – Вып. 8 (412) - с. 39-45 (1988).