

широких страт, как известно [8], характерен процесс распада на более узкие. Этот процесс завершается на рис. 1 к моменту $T=3.9$. Продолжающийся движение БИ увлекает одну часть распавшейся страты до границы среды, где импульс и страта, как это характерно для БИ [2], исчезают. Оставшаяся часть страты оказывается неустойчивой и схлопывается. Таким образом, можно сказать, что движущийся комплекс БИ—страта стирает неподвижную страту.

На рис. 2 видно, что аналогичный процесс может реализоваться и без столкновения и слияния с неподвижной стратой. При распространении комплекса БИ—страта происходит уширение страты до критического размера, ее распад, схлопывание одной части и увлечение другой. Если выбрать отрезок среды достаточно длинным, то этот процесс может многократно повторяться.

На рис. 3 приведен случай, когда неувлекаемая после отщепления часть страты приходит к устойчивому состоянию и не схлопывается. В таком режиме на длинном отрезке в результате пробегания БИ происходит формирование системы неподвижных страт. На этом рисунке хорошо также виден известный эффект осцилляторного установления страты: после отщепления последняя сначала сужается, потом расширяется до стационарного размера. Этот эффект предсказан в [10] и изучен в численном эксперименте в [11, 12].

Проведенное исследование расширяет представление о многообразии динамических явлений в активных средах с диффузией.

Список литературы

- [1] Балкарей Ю. И., Евтихов М. Г., Елинсон М. И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 2. С. 209—218.
- [2] Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 239 с.
- [3] Wilson H. R., Cowan J. D. // Kybernetik. 1973. Vol. 13. N 1. P. 55—80.
- [4] Балкарей Ю. И., Голик Л. Л., Елинсон М. И. Автоволновые среды (использование в электронике). М.: Знание, 1985. 64 с.
- [5] Дубинин Ф. Д. Оптоэлектронные модели однородных сред. М.: Радио и связь, 1984. 124 с.
- [6] Кернер Б. С., Осипов В. В. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. Вып. 5. С. 1675—1697.
- [7] Кернер Б. С., Осипов В. В. // Микроэлектроника. 1985. Т. 14. № 5. С. 389—407.
- [8] Балкарей Ю. И., Евтихов М. Г., Елинсон М. И. // Микроэлектроника. 1979. Т. 8. № 6. С. 493—500.
- [9] Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
- [10] Кернер Б. С., Осипов В. В. // ЖЭТФ. 1982. Т. 83. Вып. 6. С. 2201—2214.
- [11] Гафийчук В. В., Кернер Б. С., Лазурчак И. И., Осипов В. В. // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. № 2. С. 180—183.
- [12] Балкарей Ю. И., Евтихов М. Г., Елинсон М. И. // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. № 4. С. 348—351.

Институт радиотехники и электроники АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
25 апреля 1988 г.

05; 06; 09; 12

Журнал технической физики, т. 59, в. 8, 1989

ИЗМЕРЕНИЕ КОНСТАНТ МАГНИТОСТРИКЦИИ ФЕРРИТ-ГРАНАТОВЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

А. М. Гришин, В. Ф. Дроботко, Н. Н. Усов, В. А. Шаповалов

1. Разработка современных устройств памяти на цилиндрических магнитных доменах (ЦМД) предполагает решение проблемы магнитострикционных эффектов. Она возникает, например, в оценке пограничной одноосевой магнитной анизотропии (обусловленной анизотропией магнитострикционных констант) в ионно-имплантированных доменопроводящих структурах. Особую актуальность эффекты магнитострикции приобретают в запоминающих устройствах на ЦМД с токовым управлением (в силу сравнительно малой глубины магнитоэлектрических ловушек) и перспективных устройствах памяти на вертикальных блоховских линиях (при

создании бит-позиций ВБЛ ионной имплантацией] [1]. Одной из задач в этой области является измерение констант магнитоотрицки в ЦМД-содержащих материалах.

2. Известно несколько методов измерения констант магнитоотрицки. Достаточно высокую точность измерения λ (около 15 %) обеспечивает метод двухкристалльной рентгеновской дифракции [2]. Он основан на измерении сдвига дифракционного рентгеновского пика от ЭФГП, возникающего при включении внешнего магнитного поля. Однако для регистрации этого эффекта требуется очень точная юстировка исследуемой пленки, что затрудняет его применение для метрологического контроля ЭФГП в промышленных условиях.

Менее точными являются методы измерения константы магнитоотрицки в ЭФГП, основанные на измерении деформации образца во внешнем магнитном поле под действием механических напряжений [3] и на измерении электрической емкости конденсатора, между обкладками которого расположен исследуемый магнитный материал [4]. Практическое использование первого из этих методов ограничено необходимостью приложения к ЭФГП значительных механических напряжений. Недостатком второго является требование независимого измерения диэлектрической проницаемости образца.

Для неразрушающего измерения констант магнитоотрицки широко используют метод ферромагнитного резонанса (ФМР), который основан на измерении сдвига резонансной линии под действием приложенного к пленке механического напряжения [5-7]. Этот метод также обладает существенными недостатками. Низкая разрешающая способность, низкая чувствительность к магнитоупругому эффекту и большая погрешность измерений (более 20 %) обусловлены большой по сравнению со смещением шириной резонансной линии. Ширина линии ФМР в ЦМД-содержащих пленках определяется быстрорелаксирующими редкоземельными ионами, входящими в состав ЭФГП, и обычно составляет величину порядка 1—2 кЭ [8]. В то же время сдвиг линии при изгибе системы пленка—подложка до половины ее толщины не превышает нескольких десятков эрстед [5, 6].

3. Предлагаемый метод измерения констант магнитоотрицки основан на измерении полевой зависимости низкочастотной магнитной восприимчивости при перемагничивании ЭФГП. Он заключается в одновременном воздействии на магнитную пленку радиочастотного магнитного поля, механических напряжений и поля перемагничивания. При определенных значениях напряженности подмагничивающего поля наблюдаются особенности на кривой полевой зависимости дифференциальной низкочастотной магнитной восприимчивости $\chi(H)$. Такие поля соответствуют переходам пленки либо из многодоменной в однодоменное состояние, либо из состояния с одной доменной структурой в состояние со структурой другого типа. В частности, в магнитном поле, параллельном плоскости пленки и перпендикулярном оси легкого намагничивания (например, $\langle 111 \rangle$), особенность в поведении $\chi(H)$ обнаруживается в поле эффективной магнитной анизотропии H_{\parallel} . Величина H_{\parallel} изменяется в результате механического воздействия на пленку. По величине этих изменений можно судить о константе λ . Механизмы, определяющие ширину особенностей $\chi(H)$, не зависят от скорости релаксации редкоземельных ионов, а обусловлены, в основном размагничивающими полями и перераспределением объемов доменов различных магнитных фаз [9]. Типичные значения ширины таких особенностей $\chi(H)$ составляют величину в 100 Э [10], что на порядок меньше ширины линии ФМР.

4. Измерения были проведены на индуктивно-частотной установке [10] с модернизированным измерительным датчиком. Он предусматривал возможность равномерного механического нагружения исследуемой пленки, которое достигалось закреплением подложки в качестве мембраны и откачиванием или накачиванием воздуха с одной стороны от нее. В этом случае для системы пленка—подложка, выполненной в виде диска с радиусом R , много большим толщины h , однородное механическое нагружение реализуется при прогибе центра диска до величины, не превышающей половины его толщины. Прогиб контролировался измерением разности давлений p по обе стороны диска. При этом напряжение σ в пленке выражается через p согласно формуле [11]

$$\sigma = \frac{3}{8} (3 + \nu) p \left(\frac{R}{h} \right)^2, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Приложенное к пленке механическое напряжение σ в результате эффекта магнитоотрицки приводит к смещению поля эффективной магнитной анизотропии H_{\parallel} [5, 6] на величину

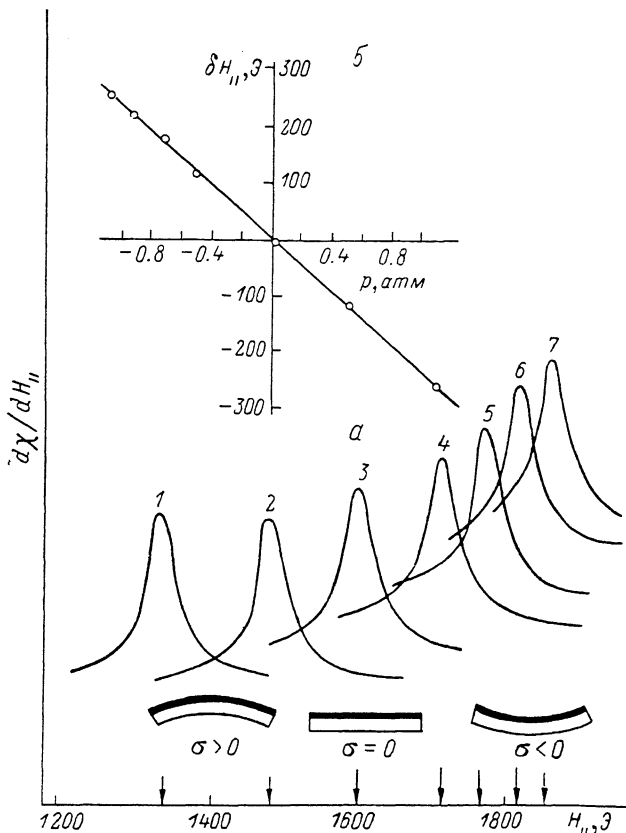
$$\delta H_{\parallel} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{111}}{M_s} \sigma, \quad (2)$$

где M_s — намагниченность насыщения, σ принимается положительным в случае растяжения пленки.

Расчетная формула для определения константы магнитоотрицательности λ с учетом соотношений (1), (2) приобретает вид

$$\lambda_{111} = \frac{\delta H_{\parallel} M_s}{p} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \frac{16}{9(3 + \nu)}. \quad (3)$$

Увеличение точности измерения константы λ в методе низкочастотной восприимчивости (НВ) обеспечивается сужением полосы заметных изменений $\chi(H)$ по сравнению с шириной линии ФМР. При прочих равных условиях ошибка в определении значения магнитного поля



Экспериментальная запись производной по магнитному полю от дифференциальной восприимчивости $d\chi/dH_{\parallel}$ в функции планарного магнитного поля H_{\parallel} для различных давлений p (а) и зависимость величины смещения поля эффективной магнитной анизотропии δH_{\parallel} от давления p (б).

1, 2 — растяжение пленки ($\sigma > 0$); 4–7 — сжатие ($\sigma < 0$).

в резонансе (для ФМР метода) или в максимуме $d\chi/dH_{\parallel}$ (для НВ метода) пропорциональна ширинам линий. Как указывалось выше, полоса заметных изменений $\chi(H)$ на порядок уже ширины ФМР линии. Это означает, что погрешность измерения константы λ , обусловленная ошибкой при измерении сдвига магнитного поля δH_{\parallel} , в НВ методе на порядок меньше, чем в ФМР методе.

Для измерения λ использовалась стандартная пленка граната $(YSmLuCa)_3(FeGa)_5O_{12}$ с осью легкого намагничивания $\langle 111 \rangle$, перпендикулярной плоскости пленки. Намагниченность насыщения пленки $4\pi M_s = 190$ Э. Пленка была нанесена на галлий-гадолиниевую подложку (коэффициент Пуассона $\nu = 0.29$) толщиной $h = 0.527$ мм, которая свободно опиралась на кольцо радиуса $R = 14$ мм. К системе пленка—подложка прикреплялась многослойная катушка индуктивности диаметром 5 мм. По разные стороны системы пленка—подложка создавалась разность давлений p до 1 атм. Измерения дифференциальной магнитной восприимчивости велись на частоте 1 МГц в планарном магнитном поле до 2 кЭ.

По смещению поля магнитной анизотропии (см. рисунок, б) (оно идентифицировалось по максимуму производной $d\chi/dH_1$ на рисунке, а) расчетным путем по формуле (3) определена константа магнитострикции $\lambda = -2.55 \cdot 10^{-6}$ с точностью $\pm 3\%$.

Список литературы

- [1] Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах / Под ред. Н. Н. Евтихиева и Б. Н. Наумова. М.: Радио и связь, 1987. 488 с.
- [2] *Mada J., Yamaguchi K.* // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 1. P. 596—600.
- [3] *Jida I.* // J. Phys. Soc. Jap. 1967. Vol. 22. N 5. P. 1201—1209.
- [4] *Callen E. R., Clerk A. E., Desavage B.* et al. // Phys. Rev. 1963. Vol. 130. N 5. P. 1735—1740.
- [5] *Велла-Колейро Г. П.* // ПНИ. 1979. № 9. С. 97—100.
- [6] *Wang X., Krafft C. S., Kryder M. H.* // IEEE Trans. Magn. 1982. Vol. MAG-18. N 6. P. 1295—1297.
- [7] *Иевенко Л. А., Богоунов В. Г., Кожухарь А. Ю., Устинов В. М.* // V Всесоюз. семинар ЦМД «Физические свойства и технические применения». М., 1981. С. 11.
- [8] *Телеснин Р. В., Зюзин А. М., Мартынов А. Ф., Рандошкин В. В.* // Физика магнитных материалов. Иркутск, 1981. С. 94—97.
- [9] *Белов К. П., Звездин А. К., Кадомцева А. М., Левитин Р. З.* Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1979. 317 с.
- [10] *Барьяхтар Ф. Г., Хребтов А. О., Сауцкий А. И.* Препринт ФТИ АН УССР. № 1 (169). Донецк, 1986. 60 с.
- [11] *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. Киев: Наукова думка, 1972. 501 с.

Донецкий
физико-технический институт
АН УССР

Поступило в Редакцию
19 апреля 1988 г.
В окончательной редакции
29 июля 1988 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРЕГУЛЯРНОГО ДОГОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СКАЧКОВ УПЛОТНЕНИЯ МЕТОДОМ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АНАЛОГОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*М. Д. Герасимов, М. П. Сыщикова, Н. А. Тихомиров,
В. А. Ус, И. Р. Якубов*

До настоящего времени не решены многие вопросы, связанные с нерегулярным нестационарным взаимодействием плоских скачков уплотнения одного направления. Не определены критерии перехода от одного вида ударно-волновой конфигурации к другому при изменении параметров взаимодействия, продолжается анализ возможных типов ударно-волновых конфигураций и др.

Нерегулярное догонное взаимодействие может реализовываться в процессе выхода тела, движущегося со сверхзвуковой скоростью из области, охваченной ударной волной. Такая задача является трудновоспроизводимой в условиях физического и численного моделирования. Поэтому для исследования данного класса взаимодействий оказывается перспективным метод газогидравлической аналогии (ГГА) с применением способа буксировки моделей. В последнее время разработаны, развиты и усовершенствованы методы и средства гидравлического аналогового моделирования, направленные на обнаружение новых газодинамических эффектов, получение научной информации о физических картинах обтекания в той области изменения определяющих параметров, которая находится за пределами возможностей физических и численных методов исследования [1, 2, 3].

В данной работе приводятся результаты исследования отдельных аспектов нерегулярного взаимодействия скачков уплотнения при догоне плоской ударной волны телом, движущимся со сверхзвуковой скоростью, методом ГГА.

Последовательность аналогового испытания следующая. Волнопродуктором имитируется плоская ударная волна, перемещающаяся в неподвижном слое «мелкой воды» с числом Маха фронта $M_{\text{фр}} = U_{\text{фр}} / \sqrt{gh}$ ($U_{\text{фр}}$ — скорость фронта волны, h — глубина слоя воды,