

сигнала с выхода ОВ регистрировался на выходе монохроматора МДР-23. На рисунке приведены образцы спектрограмм для ОВ в двухмодовом режиме в диапазоне $\lambda = 544$ нм на образцах длиной $l = 2.45$ м (а) и $l = 1.25$ м (б). Период спектральной модуляции в этих случаях составил 0.24 и 0.47 нм соответственно, временные задержки в приходе двух модовых групп – 3.1 и 6.0 пс, разница постоянных распространения $\Delta\beta = 58$ см⁻¹.

Следует отметить, что измерение разницы постоянных распространения модовых групп в ОВ и временных задержек позволяет получить информацию о межмодовой и поляризационной дисперсии ОВ, модовом составе излучения и связи мод. К достоинствам предлагаемого метода следует отнести простоту практической реализации и высокую точность измерений временных задержек порядка 0.1 пс.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б а б к и н а Т.В., Г р и г о р ь я н ц В.В., С м и р н о в В.Б. // КЭ. 1984. Т. 11. С. 1899.
- [2] P i a s e s k i J., S o l o m b e a u В., V a m p r o u i l l e M., F r o e h l y С., A r n а u d J.A. // Appl. Opt. 1980. V. 19. P. 3749.
- [3] Авторское свидетельство № 1387694.
- [4] С к р о ц к и й Г.В. Материалы У1 Всесоюз. школы по голографии. Л., 1974.
- [5] Б у т у с о в М.М., В а в и л о в а О.С., М а л ю г и н В.И. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1984. Т. 27. С. 89.

Ленинградский
политехнический институт
им. М.И. Калинина

Поступило в Редакцию
1 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 6
05.2; 12

26 марта 1989 г.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

И.И. К р ю к о в, Н.А. М а н а к о в,
В.Б. С а д к о в, К.С. С а х а е в

Эффективность материалов для постоянных магнитов определяется максимальным значением энергетического произведения $(BH)_{\text{макс}}$. Теоретический предел этой величины, равный $(2\pi M)^2$, достигается, если остаточная намагниченность в полях $|H| \leq 2\pi M$ равна намагниченности насыщения (M) . В известных сплавах для постоянных

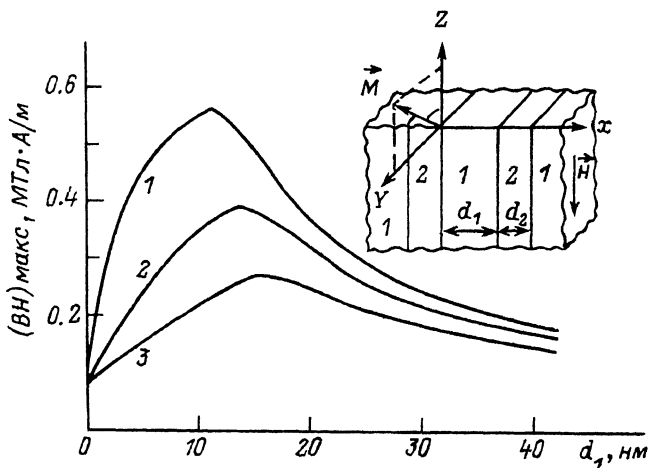


Рис. 1. Зависимость $(BH)_{\text{макс}}$ от толщины ВМ-слоя d_1 при различных толщинах ВА-слоя: 1) $d_2 = 20 \text{ \AA}$, 2) $d_2 = 80 \text{ \AA}$, 3) $d_2 = 200 \text{ \AA}$. $A_1 = A_2 = 10^{-6} \text{ эрг/см}$, $M_1 = 1500 \text{ Гс}$, $M_2 = 500 \text{ Гс}$, $K_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ эрг/см}^3$, $K_2 = 10^8 \text{ эрг/см}^3$, $N_{A1} = 666.7 \text{ Э}$, $N_{A2} = 400 \text{ кЭ}$.

магнитов сочетание фундаментальных параметров, определяющих $(BH)_{\text{макс}}$ (M и константа анизотропии K), не является оптимальным. Материалы с высокой анизотропией ($K \gg M^2$) характеризуются невысокими значениями M , например $SmCo_5$ (850 Гс). С другой стороны, материалы с большой M , например Fe (1707 Гс) и Co (1440 Гс), имеют рекордные значения $(BH)_{\text{макс}}^{\text{теор}}$, которые, однако, невозможно реализовать из-за невысокой магнитной анизотропии ($K \lesssim M^2$). В этих условиях, кроме поиска принципиально новых высокоанизотропных сплавов с большой намагниченностью, представляет интерес создание композиционных материалов, состоящих по меньшей мере из двух обменносвязанных фаз: высокоанизотропной (далее ВА), поддерживающей высокие значения коэрцитивной силы H_c , и фазы с большой намагниченностью (далее ВМ), обеспечивающей высокую среднюю намагниченность. В этом случае можно надеяться на значительный рост $(BH)_{\text{макс}}$.

С целью теоретического обоснования такой возможности в настоящей работе вычислены $(BH)_{\text{макс}}$ многослойной системы чередующихся ВМ и ВА обменносвязанных плоскопараллельных слоев толщинами d_1 и d_2 соответственно ($M_1 > M_2$, $K_2 > K_1$). Данная геометрия системы выбрана с учетом последних достижений технологии в получении многослойных структур и широкого практического использования пленочных постоянных магнитов.

Поскольку нас интересуют предельные возможности таких многослойных систем, рассмотрим наиболее оптимальный случай, когда все слои имеют одноосную анизотропию, лежащую в плоскости, а их легкие оси параллельны друг другу и внешнему полю. Для расчетов $(BH)_{\text{макс}}$ использовались соотношения:

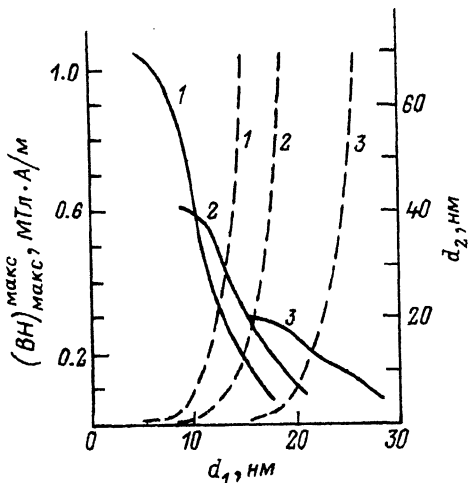


Рис. 2. Зависимости толщин ВА-слоя d_2 (штрихованная линия), отвечающих максимумам на кривой $(BH)_{\text{макс}}$ (d_1) и соответствующих значений $(BH)_{\text{макс}}$ от толщины ВМ-слоя d_1 , при различных величинах намагниченности ВМ-слоя M_1 : 1) 2000 Гс, 2) 1500 Гс, 3) 1000 Гс. Остальные магнитные параметры те же, что и на рис. 1.

$$(BH)_{\text{макс}} = \begin{cases} (2\pi\bar{M})^2 & \text{при } H_0 \geq 2\pi\bar{M} \\ (4\pi\bar{M} - H_0) \cdot H_0 & \text{при } H_0 \leq 2\pi\bar{M}, \end{cases} \quad (1a)$$

где H_0 - поле разрушения однородно намагниченного состояния (ОНС), а $\bar{M} = \frac{M_1 d_1 + M_2 d_2}{d_1 + d_2}$ - средняя намагниченность системы

в ОНС. Для определения H_0 учтем, что разрушение ОНС при такой геометрии происходит неоднородным вращением вектора намагниченности M в плоскости YZ :

$$M_x(x, y, z) = 0, \quad M_y(x, y, z) = M \sin \omega(x), \quad M_z(x, y, z) = M \cos \omega(x),$$

причем угол ω между осью Z и \vec{M} зависит только от x и удовлетворяет линеаризованному уравнению Эйлера [1, 2]:

$$\omega''(t) + \frac{K(t)}{A(t)} d_1^2 \left(\frac{HM(t)}{2K(t)} - 1 \right) \omega(t) = 0, \quad t = \frac{x}{d_1} \quad (2)$$

с периодическими граничными условиями:

$$\omega(t) = \omega(t + n\rho), \quad \omega'(t) = \omega'(t + n\rho), \quad \rho = \frac{d_1 + d_2}{d_1}, \quad n = \dots, -1, 0, 1, \dots \quad (3)$$

Для H_0 характерно резкое падение при увеличении d_1 с быстрым выходом на асимптотическое значение, равное полю анизотропии ВМ-слоя. Это существенно ограничивает диапазон толщин d_1 ,

Система	$(BH)_{\text{макс}}$, МГс Э	d_1 , нм	d_2 , нм
$SmCo_5 + Co$	78	17	1
	70	18	4
$SmCo_5 + Fe$	105	10	1
	99	11	2
	88	12	4
$Nd_2Fe_{14}B + Fe$	106	5	1
	103	7	2
	98	8	4

где можно ожидать заметного увеличения $(BH)_{\text{макс}}$. Действительно, при малых d_1 , когда ОНС достаточно устойчиво и условие $H_0 \geq 2\pi\bar{M}$ легко выполняется, рост средней намагниченности и $(BH)_{\text{макс}}$ незначителен. С увеличением d_1 , когда \bar{M} увеличивается, резко падает устойчивость ОНС. В результате зависимость $(BH)_{\text{макс}}$ от d_1 становится немонотонной и имеет максимум (далее $(BH)_{\text{макс}}$) (рис. 1). С уменьшением толщины ВА-слоя $(BH)_{\text{макс}}$ растет и смещается в сторону малых d_1 (рис. 2), причем резкость максимума увеличивается. Такое поведение $(BH)_{\text{макс}}$ обусловлено увеличением средней намагниченности с уменьшением концентрации ВА-фазы. Наибольшие значения $(BH)_{\text{макс}}$ достигаются при экстремально тонких ВА-слоях.

Расчеты $(BH)_{\text{макс}}$ для конкретных многослойных материалов представлены в таблице. Они полностью согласуются с уже сделанными выводами о возможности значительного увеличения $(BH)_{\text{макс}}$.

С экономической точки зрения наиболее интересной из представленных является система $Nd_2Fe_{14}B + Fe$. При этом эффект увеличения $(BH)_{\text{макс}}$ можно ожидать не только в многослойной структуре, но и при других геометриях выделения фаз, управляя процессом структурообразования магнитов $NdFeB$, обогащенных железом.

Расчеты указывают на относительно слабую зависимость $(BH)_{\text{макс}}$ от константы анизотропии ВА-фазы. На слабое влияние константы магнитной анизотропии ВА-фазы при поверхностном модифицировании уже обращалось внимание в [3, 4], в данном случае природа этого эффекта аналогична.

Таким образом, из проведенного анализа однозначно вытекает возможность значительного увеличения $(BH)_{\text{макс}}$ постоянных магнитов путем создания композиционных магнитных систем.

В заключение авторы приносят благодарность Б.Г. Лившицу за проявленный интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А н а г о н и А. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. N 3. P. 2455-2465.
- [2] С а х а е в К.С., Ш и л и н В.М. В кн.: Физика магнитных материалов. Иркутск, 1984 С. 133-136.
- [3] К р ю к о в И.И., М а н а к о в Н.А., С а д к о в В.Б. // ФММ, 1985. Т. 59. № 3. С. 455-462.
- [4] К р ю к о в И.И., М а н а к о в Н.А., С а д к о в В.Б., Ш е л к о в н и к о в В.Н. В кн.: Физика магнитных материалов. Калинин, 1986 С. 36-40.
- [5] К р ю к о в И.И., С а д к о в В.Б., С а х а е в К.С. В кн.: Тез. докл. 1X Всес. конф. по постоянным магнитам. М.: Информэлектро, 1988. С. 12.

Поступило в Редакцию
18 декабря 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 6
04; 10

26 марта 1989 г.

ИЗОТРОПИЗАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО И МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

В.Ф. Л а п ш и н, А.П. М е з е н ц е в,
А.С. М у с т а ф а е в

В результате зондовых исследований процессов релаксации интенсивного моноэнергетического пучка электронов (МЭПЭ) впервые экспериментально обнаружено предсказанное теоретически [1] явление изотропизации МЭПЭ в бесстолкновительной плазме. Исследования проводились в аксиально-симметричной плазме низковольтного разряда в гелии при относительно малых давлениях, когда транспортная длина пробега быстрых электронов на нейтральных атомах l_0 больше или порядка межэлектродного расстояния. Разряд создавался между плоским катодом и анодом, диаметр которых превышал расстояние между ними. Аксиальная симметрия поддерживалась боковой проводящей цилиндрической поверхностью, находящейся под потенциалом катода. В условиях исследуемого разряда МЭПЭ формировался при ускорении электронов, эмиттируемых термокатодом, в прикатодном люнгомюровском слое. Энергия электронов пучка \mathcal{E}_0 была порядка 30 эВ, а тепловых электронов плазмы - порядка 1 эВ. Во всех случаях концентрация быстрых электронов была меньше