

УДК 538:681.327:634.071.1

Масуд Махджубіан, аспірант (Тел. +380 44 249 29 27)

Розорінов Г. М., докт. техн. наук, професор (Тел.: +380 63 248 95 27. E-mail: rozor46@mail.ru)  
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## ВИСОКОМОМЕНТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МАГНІТНИХ ГОЛОВОК ЦИФРОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

**Масуд Махджубіан, Розорінов Г. М. Високомоментні матеріали для магнітних головок цифрових накопичувачів.** Вивчаються високомоментні матеріали, які є одним з можливих технологічних рішень для забезпечення високої щільності запису в цифрових накопичувачах. Поверхнева щільність більше 200 Кбіт/мм<sup>2</sup> була досягнута при поздовжньому запису, використовуючи конструкцію записуючої головки із плоским верхнім полюсом. Для посилення магнітних властивостей робочих шарів носіїв для перпендикулярного запису виду Fe-Co-B рекомендовано використовувати додаткові підшари состава Ni-Fe. Ці підшари ефективно зменшують коерцитивну силу й збільшують площинну магнітну анізотропію.

**Ключові слова:** високомоментний матеріал, коерцитивна сила, магнітна анізотропія, перпендикулярний запис, поверхнева щільність запису.

**Масуд Махджубіан, Розорінов Г. Н. Високомоментные материалы для магнитных головок цифровых накопителей.** Изучаются высокомоментные материалы, которые являются одним из возможных технологических решений для обеспечения высокой плотности записи в цифровых накопителях. Поверхностная плотность более 200 Кбит/мм<sup>2</sup> была достигнута при продольной записи, с использованием конструкции записывающей головки с плоским верхним полюсом. Для усиления магнитных свойств рабочих слоев носителей для перпендикулярной записи вида Fe-Co-B рекомендовано использовать дополнительные подслои состава Ni-Fe. Эти подслои эффективно уменьшают коэрцитивную силу и увеличивают поверхностную магнитную анизотропию.

**Ключевые слова:** высокомоментный материал, коэрцитивная сила, магнитная анизотропия, перпендикулярная запись, поверхностная плотность записи.

**Masoud Mahjoubian, Rozorynov G. N. A high-torque materials for magnetic heads of digital storage devices.** A high-torque materials which are one of possible technological decisions for providing of high-density recording in digital storage devices are studied. Surface density over 200 Kbit/mm<sup>2</sup> was attained at a longitudinal record, with the use of construction of writing down head with a flat overhead pole. For strengthening of soft magnetic properties of workings layers of magnetic medium for the perpendicular record of Fe-Co-B type it is recommended to utilize the additional Ni-Fe sublayers. These sublayers effectively diminish a coercitivity and increase a surface magnetic anisotropy.

**Keywords:** high-torque material, coercitivity, magnetic anisotropy, perpendicular record, surface bit density.

**Вступ.** Використання високомоментних матеріалів в індукційних записуючих головках є обов'язковою умовою для досягнення надвисокої поверхневої щільності поздовжнього й перпендикулярного запису. У даній статті обговорюються магнітні властивості високомоментних осаджених плівок. Сучасні конструкції головок і прогресивні тонкоплівкові технології дозволяють успішно впроваджувати такий тип матеріалів. Показано, що використання для поздовжнього запису конструкції записуючої головки із плоским верхнім полюсом [1] може забезпечити поверхневу щільність запису в 201 Кбіт/мм<sup>2</sup>, а використання зондових головок - більше 224 Кбіт/мм<sup>2</sup>.

**Високомоментні матеріали.** Високомоментні плівки (Fe<sub>0,7</sub>Co<sub>0,3</sub>)<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> [2] можуть бути отримані в середовищі газової суміші Ar/N<sub>2</sub>, за допомогою реактивного магнетрона осадженням при постійному струмі. Одношарові FeCo плівки мають типові значення коерцитивної сили в межах 50 Е і магнітні властивості, ізотропні в площині. Для посилення магнітних властивостей і забезпечення чітко вираженої одноосової анізотропії доцільно виконати тонкошарове покриття магнітною плівкою Ni<sub>15</sub>Fe<sub>45</sub>. Магнітні властивості плівок вимірялися за допомогою самописа петель гістерезису й вібраційного магнітометра.

На величину магнітного моменту  $B_s$  плівки покриття істотно впливають товщина шару покриття, ступінь осадження, відстань між мішенню й підкладкою й кількість азоту в газовому осаджуючому середовищі, у той час як коерцитивна сила плівки головним чином

залежить від тиску газового середовища, змісту азоту й зсуву підкладки. Вплив змісту азоту на рівень магнітних властивостей показаний на Рис. 1.

На цьому рисунку штрихова лінія позначає залежність  $B_s$ , штрих-пунктирна лінія – вісі легкого і суцільна лінія – вісі важкого намагнічування  $H_c$  напилених плівок FeCoN від вмісту  $N_2$  в газовому середовищі, що осаджується.

Експериментальне дослідження показало, що  $B_s$ , спочатку збільшуючись, надалі монотонно знижується в міру збільшення змісту азоту в газовому середовищі. Вісі легкого й важкого намагнічування коерцитивної сили виявляють стійкий мінімум при вмісті азоту від 1 до 10%. Типова петля гістерезису високомоментної плівки FeCoN товщиною 0,3 мкм, отриманої при оптимальних умовах осадження, показана на Рис. 2.

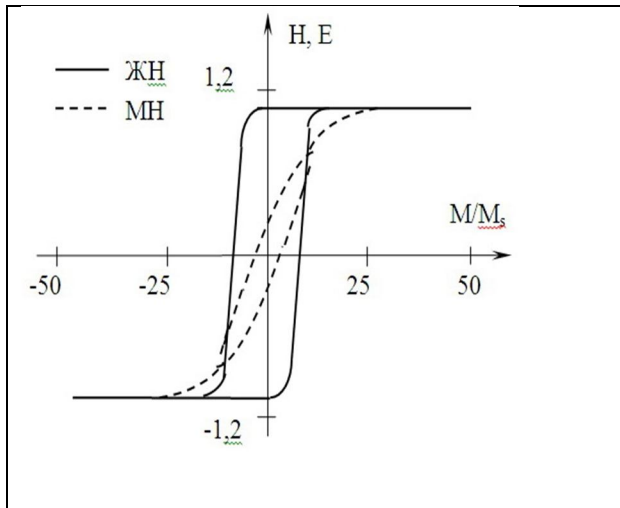


Рис. 1. Залежність магнітних властивостей від змісту азоту

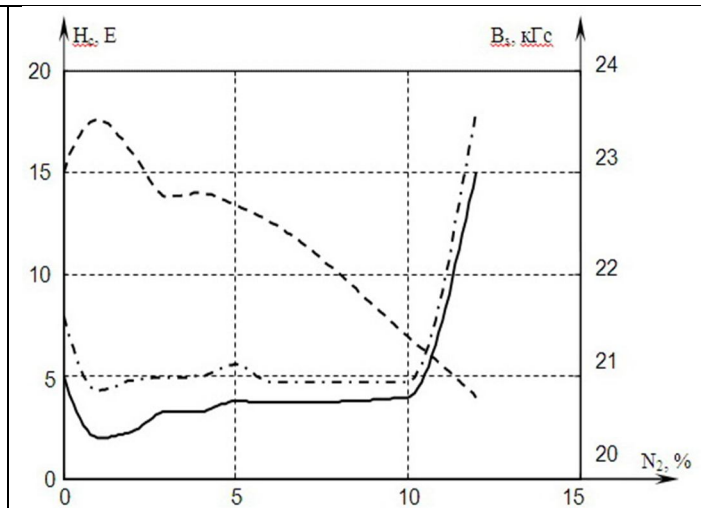


Рис. 2. Петля гістерезису плівки FeCoN товщиною 0,3 мкм

З Рис. 2 видно, що  $H_c$  в напрямках легкого й важкого намагнічування становить значення 4,0 Е і 1,6 Е, відповідно, а величина поля анізотропії  $H_K$  дорівнює 15 Е. Магнітострикція постійна й дорівнює приблизно  $4,5 \cdot 10^{-5}$ .

Тест на електрохімічну корозію плівок виконаний із застосуванням 0,01М розчину NaCl. У порівнянні з вихідними плівками NiFe<sub>45</sub>, NiFe<sub>58</sub> й Co<sub>67</sub>Ni<sub>11</sub>Fe<sub>22</sub> покриття FeCo плівкою знижує корозійний потенціал  $E_{кор}$  і корозійний струм  $I_{кор}$ , демонструючи кращу здатність до опору корозії й більш високий позитивний потенціал розімкнутого ланцюга, що вказує на істотну схильність до виду поверхневої пасивації.

Для поліпшення властивостей плівок з різним вмістом азоту на мікроструктурному рівні використалася рентгенівська дифракція. Як видно з Рис.3, плівки FeCoN з різним вмістом  $N_2$  (%) та з текстурою (100) мають пік інтенсивності, що зменшується в міру збільшення змісту азоту, що відповідає зменшенню розміру зерна.

Поліпшення магнітних властивостей за рахунок покриття пояснюється поліпшенням текстури FeCo (100), зменшенням розміру зерна через ріст розколених стовпчастих зерен і магнітним зчепленням магнітних шарів Ni<sub>55</sub>Fe<sub>45</sub> з FeCo, що в підсумку забезпечує кращу одноосьову анізотропію.

**Головки для поздовжнього запису.** Головка для поздовжнього запису конструктивно поєднує плоский верхній полюс і нижню полюсну підставу, що забезпечує найменший перетин. На Рис. 4 показане зображення поперечного перерізу записуючої головки, отримане методом скануючої електронної мікроскопії.

Конструкція цієї записуючої головки являє собою шестивиткову одношарову обмотку із кроком 1,5 мкм і довжиною в поперечнику 14 мкм.

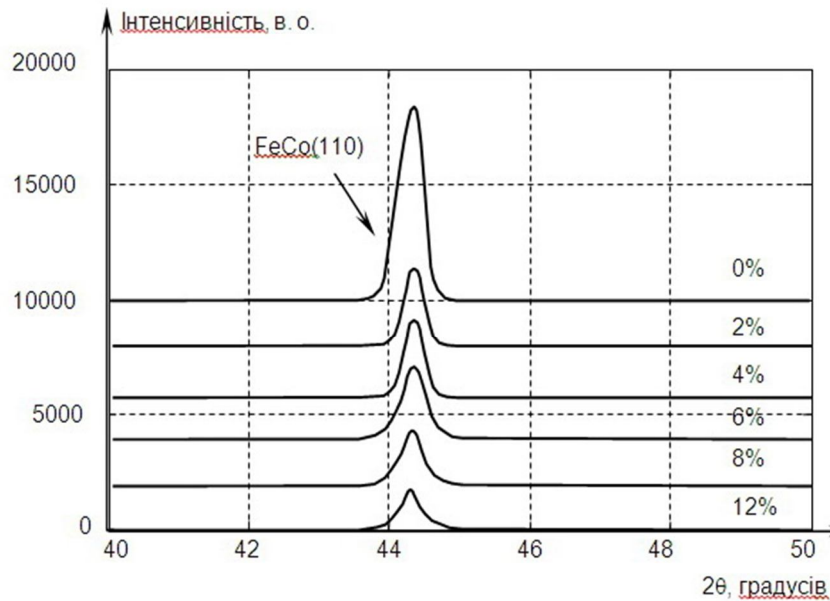


Рис. 3. Рентгеноструктурний аналіз екземплярів плівок FeCoN з різним вмістом N<sub>2</sub>, %

Плоскі тонкі підкладки – підстави нижнього полюса й ізоляційний шар обмотки виготовлялися методом хімічного фрезерування.

На нижню частину верхнього полюса напилялася плівка високомоментного FeCo товщиною 0,35 мкм у якості поточкорозширювального шару, що примикає до записуючого зазору шириною 0,09 мкм. Поверхня верхнього полюса - плівка Ni<sub>28</sub>Fe<sub>72</sub> з рівнем індукції насичення  $B_s$  більше 19 кГс (1,9 Т) методом гальванічного осадження наносилася на полюсний наконечник, що виготовлений методом іонного фрезерування у вигляді тонкої пластинки товщиною близько 0,14 мкм із прямолінійним профілем бічної стінки. Загальна висота полюсного наконечника становила 1,5 мкм. Частина нижнього полюса вище записуючого зазору підрізалася на глибину близько 0,15 мкм по ширині доріжки, так само, як і верхній полюс. Записуючий полюс із боку передньої несучої поверхні, який просканований за допомогою електронного мікроскопа, показаний на Рис. 5.

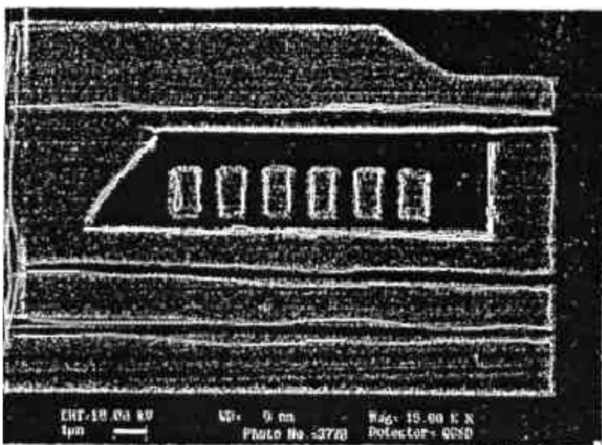


Рис. 4. Поперечний переріз плоского верхнього полюса записуючої головки для поздовжнього запису

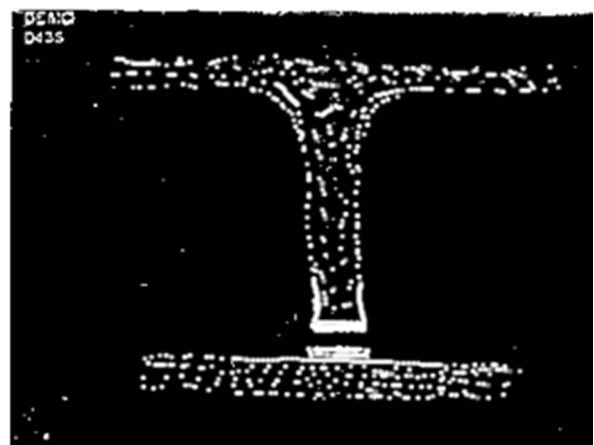


Рис. 5. Верхній полюсний наконечник записуючої головки

Нижній полюс виконаний у вигляді плівки товщиною 0,25 мкм із високою індукцією насичення  $B_s$ , осадженої на верхній частині підстави, пов'язаною із записуючим зазором. Нижній полюс із осадженої плівки з високою індукцією насичення  $B_s$  також виготовляється методом іонного фрезерування, щоб установити висоту перетину записуючої частини.

Вид поверхні записуючої головки з нанесеною плівкою FeCo на верхньому і нижньому полюсних наконечниках під електронним мікроскопом показаний на Рис. 6.

Записуючі головки здатні забезпечити рівень перезапису близько 36 дБ і нелінійні перекручування менш ніж -25 дБ при 24 Кбіт/мм<sup>2</sup> без передкомпенсації. Наприклад, була досягнута поверхнева щільність поздовжнього запису 201,5 Кбіт/мм<sup>2</sup> при швидкості 170 Мбіт/с (21 Мбайт/с).

**Головки для перпендикулярного запису.** При перпендикулярному запису використовуються однополюсні зондові головки й середовище з м'якою підкладкою, що, підвищуючи межу термічної стабільності, сприяє підвищенню щільності запису [3]. Записуючі головки для перпендикулярного запису являють собою конструкцію з однополюсною зондовою головкою, що містить у собі замикаючий нижній допоміжний полюс і головний полюс із напиляною плівкою FeCo, що має високу індукцію насичення  $B_s$ .

Зображення поперечного перерізу головки для перпендикулярного запису показане на Рис. 7. Передня кромка допоміжного полюса має проріз на передньо-несучій поверхні глибиною близько 1 мкм, для забезпечення ефективної провідності потоку до полюсного наконечника.



Рис. 6. Вид записуючої головки з напиляною на верхньому і нижньому полюсах плівкою FeCo

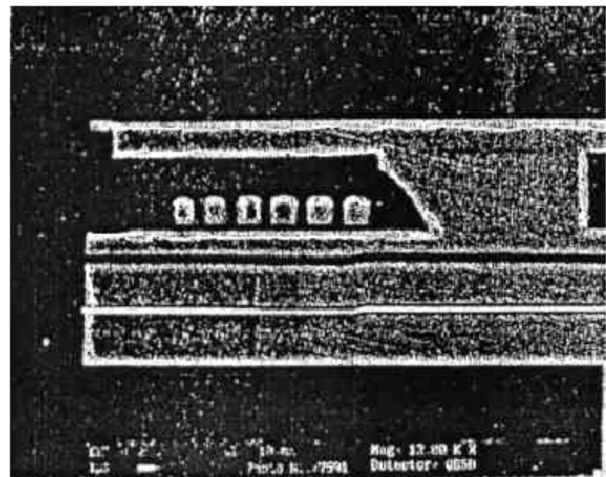


Рис. 7. Поперечний переріз однополюсної зондової головки для перпендикулярного запису

Головка містить одношарову шестивиткову обмотку. При виготовленні високомоментного головного полюса, на нижній допоміжний полюс осаджувалася плівка FeCo товщиною 0,3 мкм на попередньо хімічно й механічно відполіровану поверхню, для забезпечення площинності. Полюсні наконечники виготовлялися методом фотолітографії. Для одержання трапецієподібної форми полюса на передній несучій поверхні з бічними кутами 10°, як показано на Рис. 8, використаний метод іонного фрезерування підкладки крізь тверде покриття Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

На основі елементного моделювання запропонована трапецієподібна форма полюса з гострою й рівною верхньою кромкою, необхідною для мінімізації бічного запису при більших кутових відхиленнях [3].

Застосування осаджених FeCo плівок як основного полюсного матеріалу сприяє підвищенню ефективності записуючої головки. Висока індукція  $B_s$  плівок необхідна для того, щоб забезпечити адекватну записуючу здатність для надвисокої щільності. Записуюча магнітна головка оптимізована для ширини доріжки 0,18 мкм, забезпечуючи при перезаписі віддачу більш, ніж 40 дБ, при струмі запису менш 5 мА, а нелінійні перекручування менше, ніж -30 дБ при щільності приблизно 40 Кбіт/мм<sup>2</sup> без передкомпенсації.

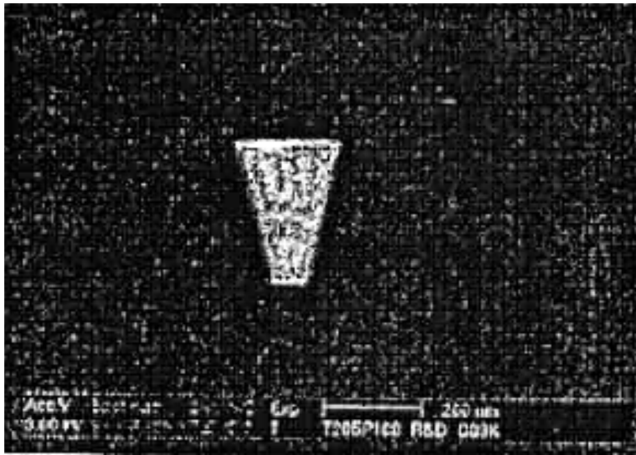


Рис. 8. Трапецієподібний полюсний наконечник для перпендикулярної записуючої головки

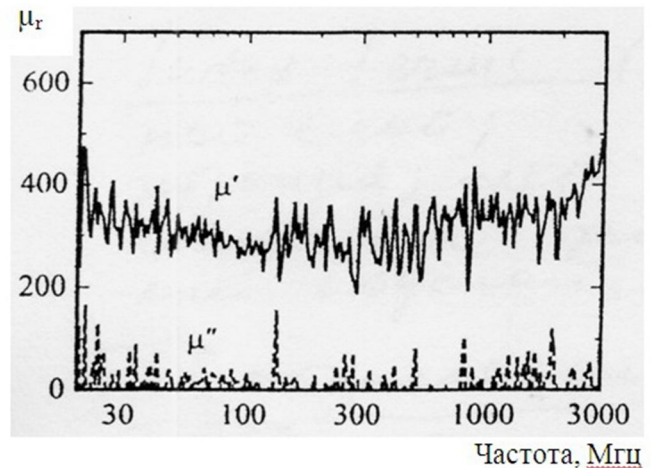


Рис. 9. Залежність відносної магнітної проникності від частоти

Надзвичайні магнітні властивості плівок покриття FeCo проявляються в низькій залишковій намагніченості й, таким чином, мінімальному саморозмагнічуванню записуваних даних навіть при дуже малих розмірах полюсного наконечника. Відзначається, що магнітні домени в головному полюсі формують бажану доменну структуру, забезпечувану магнітними матеріалами [4]. Спостерігається, що намагніченість обертання головним чином впливає на провідність потоку через поперечний переріз головки, що проявляється в скороченні часу проходження потоку. Завдяки трапецієподібній формі полюса забезпечується мінімальний бічний запис, що підтверджується вимірами профілів при кутах нахилу  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  й  $+10^\circ$ . Використовуючи сучасні носії для перпендикулярного запису з м'якою підкладкою, при оптимальних комбінаціях головка-носій можна забезпечити лінійні щільності 30 Кбіт/мм і щільність доріжок 7400 дор/мм. При цьому поверхнева щільність перевищує 224 Кбіт/мм<sup>2</sup> при швидкості, більшій, ніж 420 Мбіт/с (52,5 Мбайт/с).

Магнітні підшари носіїв для надвисокощільного запису вивчаються досить інтенсивно [5]. Матеріали з високою намагніченістю насичення  $4\pi M_s$  й високою відносною магнітною проникністю  $\mu$  одержують використовуючи нанотехнології. Відомо, що поле неосьової магнітної анізотропії в магнітних підшарах відіграє важливу роль у підвищенні відношення сигнал-шум, за рахунок орієнтації осей легкого й важкого намагнічування. Показано, що це відношення може бути підвищене на 2 дБ [6].

Тонкі плівки  $Fe_xCo_{1-x}$  при значеннях  $x = 20...50$  мають високе значення  $4\pi M_s$  (близько 24 кГс або 2,4 Тл) і високу напруженість неосьової магнітної анізотропії (близько 50 Е). Однак, Fe-Co тонкі плівки мають і дуже високу магнітострикцію насичення. Така велика магнітострикція приводить до деградації магнітних властивостей, що підвищує рівень шумів.

Вихід із цієї ситуації бачиться в розвитку багатошарових структур. Одним з варіантів є застосування плівок виду  $[Fe-Co-B/Ni-Fe-O]_n$  з малою коерцитивною силою

(близько 11 Е) уздовж осі важкого намагнічування й з великою напруженістю неосьової магнітної анізотропії (близько 255 Е). Це досягається введенням до складу основного шару бора й використанням Ni-Fe-O підшарів. Слід зазначити, що навіть дуже тонкий підшар (3 нм) достатній для того, щоб зменшити значення коерцитивної сили шару Fe-Co-B. Шар Fe-Co-B, осаджений на підшар товщиною 3 нм має зигзагоподібні магнітні домени.

На Рис. 9 показана залежність відносної магнітної проникності від частоти для подвійних шарів Fe-Co-B (200 нм)/Ni-Fe (20 нм).

Значення дійсної складової комплексної магнітної проникності  $\mu_r'$ , обчислене зі співвідношення  $\mu_r' = 4\pi M_s / H_k$ , виявилось рівним 84, а обмірюване на пермеаметрі склало близько 350. Уявна складова комплексної магнітної проникності  $\mu_r''$  подвійного шару була близька до нуля на частотах до 3 ГГц. З урахуванням погрішності експерименту це вказує на те, що феромагнітна резонансна частота  $f_r$  розташовується на частотах понад 3 ГГц. Таке високе значення  $f_r$  подвійних шарів Fe-Co-B/Ni-Fe можна співвіднести з високими значеннями  $H_k$  й  $4\pi M_s$ .

**Висновки.** Використання високомоментних матеріалів є одним з можливих технологічних рішень для забезпечення високої щільності запису. Поверхнева щільність 201 Кбіт/мм<sup>2</sup> була досягнута при поздовжньому запису, використовуючи конструкцію записуючої головки із плоским верхнім полюсом.

Поверхнева щільність більше 224 Кбіт/мм<sup>2</sup> може бути забезпечена при використанні сучасних зондових головок із трапецієподібними полюсними наконечниками.

Для посилення магнітноточних властивостей робочих шарів носіїв для перпендикулярного запису виду Fe-Co-B рекомендується використати додаткові підшари состава Ni-Fe. Ці підшари ефективно зменшують коерцитивну силу й збільшують площинну магнітну анізотропію.

### Література

1. Stoev K., et al. "Demonstration and characterization of 130 Gb/Частота systems", presented at the 4-th Annu. Conf. Magnetism and Magnetic Materials (MMM), Tampa, FL, Nov. 2002, paper AG-08.
2. Sun N. X. Soft high saturation magnetization (Fe<sub>0,7</sub>Co<sub>0,3</sub>)<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> thin film for inductive write heads / N. X. Sun, S. X. Wang // IEEE Trans. Magn. – Sept. 2000. – Vol. 36. – P. 2506-2509.
3. Карпенков С. Х. Тонкопленочные магнитные преобразователи / С. Х. Карпенков. – Москва : Радио и связь, 1985. – 208 с.
4. Stoev K., et al. "High linear density study of advanced single pole head", presented at the Intermag Conf, Amsterdam, The Netherlands, Apr./May 2002, paper FB-05.
5. Litvinov D. Recording layer influence on the dynamics of a soft underlayer / D. Litvinov, A. Lyberatos, J. Wolfson, et al. // IEEE Trans. Magn. – Sept. 2002. – Vol. 38. – P. 1994-1996,
6. Nakatani Y. Effect of anisotropy field of soft magnetic underlayer on read/write properties in perpendicular recording media / Y. Nakatani, N. Hayashi, Y. Uesaka, H. Fukushima // In Abstr. 47<sup>th</sup> Conf. "Magnetic Materials, ES-08".