

## Выводы

Експериментально доказана можливість не-разрушаючого контролю склопластиков (входящих в группу ПКМ) методом инфракрасной эхоскопии, который благодаря качественному определению дефектов может быть применен на эксплуатационных предприятиях для экспресс-диагностики элементов планера самолета.

В этой связи следует отметить ряд проблем, требующих первоочередного решения:

- 1) определение оптимального угла введения излучения в материал;
- 2) нахождение оптимальной длины волны излучения;
- 3) установление максимальной разрешающей способности устройства;
- 4) выявление влияния лакокрасочных покрытий на результаты контроля.

## Литература

1. Белокур, И. П. Основы дефектоскопии: учебник / И. П. Белокур.— К.: Азимут-Украина, 2004.— 496 с.
2. Нацубидзе, С. А. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в конструкции планера современных воздушных судов /С. А. Нацубидзе//Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации России: сб. тр. Всерос. науч.-практ. интернет-конференции преподавателей, науч. работников и аспирантов.— Иркутск.: ИФ МГТУ ГА, 2012.— С. 56–64.
3. Куликов, В. В. Анализ типов дефектов в клеевых соединениях авиационной техники и их ремонт/В. В. Куликов, А. П. Петрова// ВИАМ 210-205708, 2010.— 11 с.
4. Мурашов, В. В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления / В. В. Мурашов, А. Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика.— 2007.— № 5.
5. Руководство по летной эксплуатации DA 40 NG; введ. 2010-04-19. DIAMOND AIRCRAFT INDUSTRIES GMBH. AUSTRIA.— 2010.

І. В. Мунштуков, О. Л. Пузирьов, В. В. Ушаков

**МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ЕХОДЕФЕКТΟΣКОПІЇ  
ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛАНЕРА ЛІТАКА В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Показано, що в умовах експлуатаційних підприємств застосування існуючих методів діагностики для контролю елементів конструкції планера літака, виготовлених із полімерних композиційних матеріалів, не завжди ефективне. Для такого контролю запропоновано використовувати метод інфрачервоної еходефектоскопії. Подано принципову схему та пристрій, зібраний на її основі. Роботоздатність підтверджено принциповою можливістю діагностування пошкоджень склопластиків за його допомогою.

**Ключові слова:** композиційні матеріали; інфрачервоне випромінювання; еходефектоскопія.

I. V. Munshukov, A. L. Puzyryov, V. V. Ushakov

**POSSIBILITY OF USING INFRARED TESTING OF THE ELEMENTS OF AIRFRAMES OF AIRCRAFTS DURING EXPLOATION**

It is shown that, in the operating businesses use existing diagnostic methods for control of airframe components of the aircraft, from polymeric composite materials are not always effective. To control these materials are encouraged to use the method of infrared flaw detection. A schematic diagram of the device and collected under it. Shows the performance and the fundamental possibility of diagnosing damage fiberglass using this method.

**Keywords:** composite materials; infrared radiation; infrared flaw detection.

УДК 534.852.621.318.13

Г. М. РОЗОРИНОВ, д-р техн. наук, професор;

МАСУД МАХДЖУБІАН, аспірант,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## МАГНІТНІ ГОЛОВКИ ДЛЯ НАДВИСОКОЩІЛЬНОГО ЗАПИСУ

Досліджуються високомоментні матеріали, які є одним із можливих технологічних вирішень для забезпечення високої щільності запису в цифрових нагромаджувачах. Поверхневої щільності понад 200 кбіт/мм<sup>2</sup> було досягнуто при поздовжньому запису з використанням конструкції записувальної головки з плоским верхнім полюсом. Із метою посилення магнітних властивостей робочих шарів носіїв для перпендикулярного запису виду Fe-Co-B рекомендовано використовувати додаткові підшари складу Ni-Fe. Ці підшари ефективно зменшують коерцитивну силу та збільшують площинну магнітну анізотропію.

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

## Вступ

Використання високомоментних матеріалів в індукційних записувальних головках є обов'язковою умовою для досягнення надвисокої поверхневої щільності поздовжнього та перпенди-

кулярного запису. У цій 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 записувальної головки із плоским верхнім полюсом [1] може забезпечити поверхневу щільність запису до 201 кбіт/мм<sup>2</sup>, а використання зондових головок — понад 224 кбіт/мм<sup>2</sup>.

### Високомоментні матеріали

Високомоментні плівки  $(\text{Fe}_{0,7}\text{Co}_{0,3})_{1-x}\text{N}_x$  [2] можуть бути отримані в середовищі газової суміші  $\text{Ar}/\text{N}_2$  за допомогою реактивного магнетрона осадженням при постійному струмі. Одношарові  $\text{FeCo}$  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 було виконано тонкошарове покриття магнітним'яким  $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{45}$ . Магнітні властивості плівок вимірювалися за допомогою самозаписувача петель гістерезису й вібраційного магнітометра.

На значення магнітного моменту  $B_s$  плівки покриття істотно впливають товщина шару покриття, ступінь осадження, відстань між мішенню та підкладкою, а також кількість азоту в газовому осаджувальному середовищі. Що ж до коерцитивної сили плівки, то вона головним чином залежить від тиску газового середовища, вмісту азоту та зсуву підкладки. Вплив вмісту азоту на рівень магнітних властивостей плівки ілюструє рис. 1, де штрихова лінія характеризує залежність від вмісту азоту в газовому середовищі, що осаджується, магнітного моменту  $B_s$ , штрих-пунктирна лінія позначає осі легкого, а суцільна лінія — осі важкого намагнічування  $H_c$  напелених плівок  $\text{FeCoN}$ .

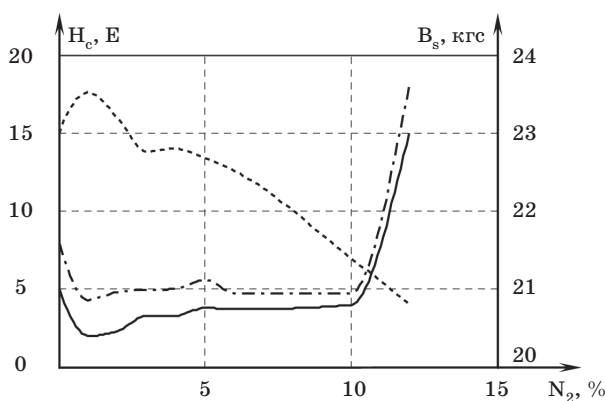


Рис. 1

Зауважимо, що значення  $B_s$  спочатку зростають, а далі монотонно спадають зі збільшенням вмісту азоту в газовому середовищі. Осі легкого і важкого намагнічування коерцитивної сили виявляють стійкий мінімум, коли вміст азоту становить 1–10%. Типову петлю гістерезису високомоментної плівки  $\text{FeCoN}$  товщиною 0,3 мкм, отриманої за оптимальних умов осадження, зображе-

но на рис. 2, де суцільними лініями позначено хід важкого, а пунктиром — легкого намагнічування.

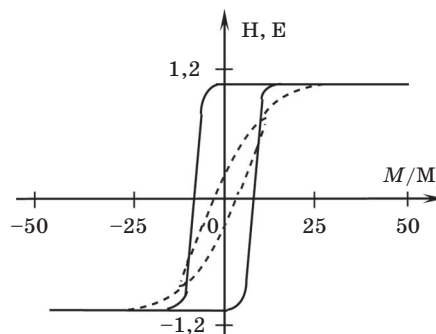


Рис. 2

При цьому значення  $H_c$  в напрямі легкого і важкого намагнічування становить відповідно 4,0 і 1,6 Е, а значення  $H_k$  поля анізотропії дорівнює 15 Е. Магнітострикція постійна й становить близько  $4,5 \cdot 10^{-5}$ .

Тест на електрохімічну корозію плівок було виконано із застосуванням 0,01М розчину  $\text{NaCl}$ . Порівняно з вихідними плівками  $\text{NiFe}_{45}$ ,  $\text{NiFe}_{58}$  і  $\text{Co}_{67}\text{Ni}_{11}\text{Fe}_{22}$  покриття плівкою  $\text{FeCo}$  знижує корозійний потенціал  $E_{\text{кор}}$  і корозійний струм  $I_{\text{кор}}$ , демонструючи кращу здатність до опору корозії та вищий додатний потенціал розімкненого кола, що вказує на істотну схильність до поверхневої пасивації.

Для поліпшення властивостей плівок із різним умістом азоту на мікроструктурному рівні використовувалась рентгенівська дифракція. Як бачимо з рис. 3, плівки  $\text{FeCoN}$  із різним умістом  $\text{N}_2$  (%) та з текстурою (100) мають пік інтенсивності, що зменшується з підвищенням вмісту азоту, що відповідає зменшенню розміру зерна.

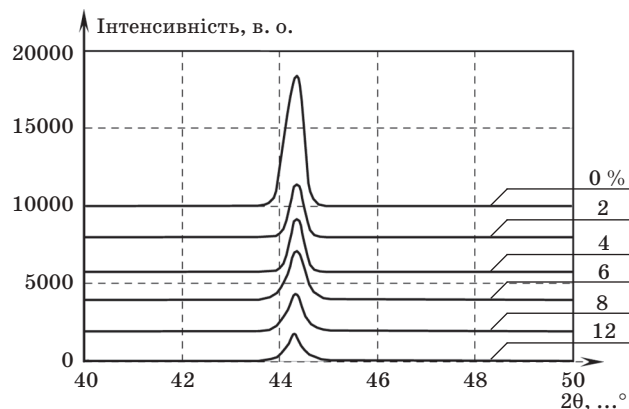


Рис. 3

Поліпшення магнітних властивостей за рахунок покриття пояснюється поліпшенням текстури  $\text{FeCo}$  (100), зменшенням розміру зерна через зростання кількості розколених стовпчастих зерен, а також магнітним зчепленням магнітним'яких шарів  $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{45}$  із  $\text{FeCo}$ , що зрештою забезпечує кращу одноосову анізотропію.

### Головки для поздовжнього запису

Головка для поздовжнього запису конструктивно поєднує плоский верхній полюс і нижню полюсну підставу, що забезпечує найменший переріз. Зображення поперечного перерізу записувальної головки, отримане методом сканувальної електронної мікроскопії, наведено на рис. 4.

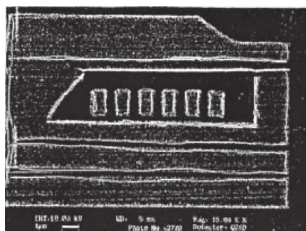


Рис. 4

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

Плоскі тонкі підкладки — підстави нижнього полюса, а також ізоляційний шар обмотки виготовлялися методом хімічного фрезерування.

На нижню частину верхнього полюса було напилено плівку високомоментного FeCo товщиною 0,35 мкм як поточкорозширювальний шар, прилеглий до записувального зазора шириною 0,09 мкм. Поверхня верхнього полюса — плівка  $\text{Ni}_{28}\text{Fe}_{72}$  із рівнем індукції насичення  $B_s$  понад 19 кГс (1,9 Т), методом гальванічного осадження наносилася на полюсний наконечник, 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, розташована вище від записувального зазора, підрізлася на глибину близько 0,15 мкм по ширині доріжки, так само як і частина верхнього полюса.

Записувальний полюс із боку передньої носійної поверхні, просканований за допомогою електронного мікроскопа, зображено на рис. 5.

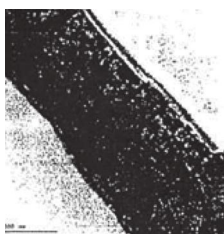


Рис. 5

Нижній полюс було виконано у вигляді плівки товщиною 0,25 мкм із високою індукцією насичення  $B_s$ , осадженої на верхній частині підстави, пов'язаної із записувальним зазором. Нижній полюс із осадженої плівки, що має високу індукцію насичення  $B_s$ , також може бути виготовлений методом іонного фрезерування з метою встановлення висоти перерізу записувальної частини.

Вигляд під електронним мікроскопом поверхні записувальної головки з нанесеною плівкою FeCo на верхньому і нижньому полюсних наконечниках наведено на рис. 6.

Записувальні головки здатні забезпечити рівень перезапису близько 36 дБ і нелінійні спотворення менш ніж мінус 25 дБ при 24 кбіт/мм<sup>2</sup> без передкомпенсації. Наприклад, було досягнуто поверхневої щільності поздовжнього запису

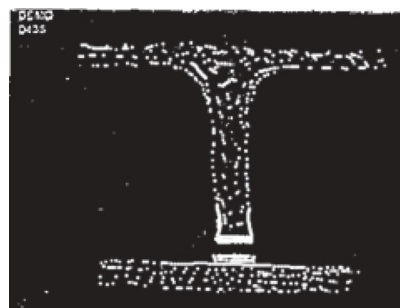


Рис. 6

201,5 кбіт/мм<sup>2</sup> при швидкості 170 Мбіт/с (21 Мбайт/с).

### Головки для перпендикулярного запису

У разі перпендикулярного запису використовують однополюсні зондові головки та середовище з м'якою підкладкою, що, підвищує межу термічної стабільності, сприяючи збільшенню щільності запису [3]. Записувальна головка для перпендикулярного запису являє собою конструкцію з однополюсною зондовою головкою, що містить у собі замикальний нижній допоміжний полюс і головний полюс із напиленою плівкою FeCo, яка має високу індукцію насичення  $B_s$ .

Поперечний переріз головки для перпендикулярного запису зображено на рис. 7.

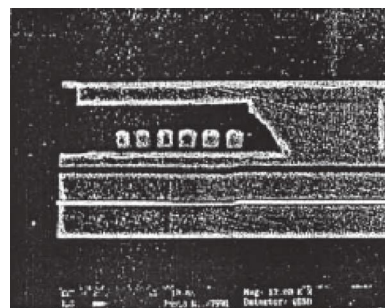


Рис. 7

Передня крайка допоміжного полюса має проріз на передньо-носієйній поверхні глибиною близько 1 мкм для забезпечення ефективної провідності потоку до полюсного наконечника.

Головка містить одношарову шестивиткову обмотку. При виготовленні високомоментного головного полюса на нижній допоміжний полюс осаджувалася плівка FeCo товщиною 0,3 мкм попередньо хімічно й механічно відполіровану поверхню з метою забезпечення площинності. Полюсні наконечники виготовлялися методом фотолітографії. Для отримання трапецієдної форми полюса на передній носійній поверхні з бічними кутами 10° використано метод іонного фрезерування підкладки крізь тверде покриття  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 8).





Рис. 8

На основі елементного моделювання запропоновано трапеціїдну форму полюса з гострою та рівною верхньою крайкою, необхідною для мінімізації бічного запису при більших кутових відхиленнях [3].

Застосування осаджених FeCo плівок як основного полюсного матеріалу сприяє підвищенню ефективності записувальної головки. Висока індукція  $B_s$  плівок необхідна для того, щоб забезпечити адекватну записувальну здатність для надвисокої щільності. Записувальна магнітна головка, оптимізована для ширини доріжки 0,18 мкм, забезпечує при перезапису віддачу більш ніж 40 дБ, якщо струм запису менший від 5 мА, а нелінійні спотворення менші за мінус 30 дБ при щільності блиско 40 кбіт/мм<sup>2</sup> без передкомпенсації. Надзвичайні магнітом'які властивості плівок покриття FeCo проявляються в низькій залишковій намагніченості, а отже, у мінімальному саморозмагнічуванні записуваних даних навіть при дуже малих розмірах полюсного наконечника.

Зауважимо, що магнітні домени в головному полюсі формують бажану доменну структуру, забезпечувану магнітом'якими матеріалами [4]. Як показують спостереження, намагніченість обертання головним чином впливає на провідність потоку через поперечний переріз головки, унаслідок чого скорочується час проходження потоку. Завдяки трапеціїдній формі полюса забезпечується мінімальний бічний запис, що підтверджується вимірами профілів, коли кут нахилу становить  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  і  $+10^\circ$ . Скориставшись сучасними носіями для перпендикулярного запису з м'якою підкладкою, можна при оптимальних комбінаціях головка-носій забезпечити лінійну щільність 30 кбіт/мм і щільність доріжок 7400 дор/мм. При цьому поверхнева щільність перевищуватиме 224 кбіт/мм<sup>2</sup> при швидкості, більшій ніж 420 Мбіт/с (52,5 Мбайт/с).

Магнітом'які підшари носіїв для надвисокощільного запису становлять предмет досить інтенсивного вивчення [5]. Матеріали з високою намагніченістю насичення  $4\pi M_s$  і високою відносною магнітною проникністю  $\mu$  отримують за допомогою нанотехнологій.

Відомо, що поле неосьової магнітної анізотропії в магнітом'яких підшарах відіграє важливу роль у підвищенні відношення сигнал-шум за рахунок орієнтації осей легкого і важкого намагнічування. Показано, що це відношення можна підвищити на 2 дБ [6].

Тонкі плівки  $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}$  при значеннях  $x = 20 \dots 50$  мають високе (близько 24 кГс, або 2,4 Т) значення

$4\pi M_s$  і високу (близько 50 Е) напруженість неосьової магнітної анізотропії. Однак Fe-Co тонкі плівки мають і дуже високу магнітострикцію насичення, яка призводить до деградації магнітом'яких властивостей, підвищуючи рівень шумів.

Вихід із цієї ситуації вбачається в розвитку багатопшарових структур. Одним із варіантів є застосування плівок виду  $[\text{Fe-Co-B}/\text{Ni-Fe-O}]_n$  із малою (близько 11 Е) коерцитивною силою вздовж осі важкого намагнічування та великою (близько 255 Е) напруженістю неосьової магнітної анізотропії. Це досягається введенням до складу основного шару бору та використанням Ni-Fe-O підшарів.

Зауважимо, що навіть дуже тонкого (3 нм) підшару достатньо для того, щоб зменшити значення коерцитивної сили шару Fe-Co-B. При цьому останній, осаджений на підшар товщиною 3 нм, має зигзагоподібні магнітні домени.

Залежність відносної магнітної проникності  $\mu_r$  від частоти для подвійних шарів Fe-Co-B (200 нм)/Ni-Fe (20 нм) наведено на рис. 9.

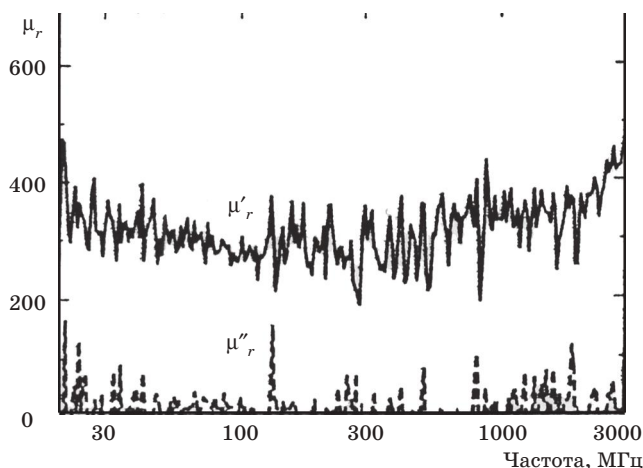


Рис. 9

Значення дійсної складової комплексної магнітної проникності  $\mu'_r$ , обчислене зі співвідношення  $\mu'_r = 4\pi M_s / H_c$ , дорівнює 84, а виміряне за допомогою пермеаметра становило близько 350. Уявна складова комплексної магнітної проникності  $\mu''_r$  подвійного шару була близька до нуля на частотах до 3 ГГц. З урахуванням похибки експерименту це вказує на те, що феромагнітна резонансна частота  $f_r$  перевищує 3 ГГц. Таке високе значення  $f_r$  подвійних шарів Fe-Co-B/Ni-Fe можна співвіднести з високими значеннями  $H_c$  і  $4\pi M_s$ .

### Висновки

Використання високомоментних матеріалів є одним із можливих технологічних вирішень для забезпечення високої щільності запису. Поверхневої щільності 201 кбіт/мм<sup>2</sup> було досягнуто при поздовжньому запису. За допомогою конструкції записувальної головки з плоским верхнім полюсом.

Поверхневу щільність понад 224 кбіт/мм<sup>2</sup> може бути забезпечено з використанням сучасних зондових головок із трапецієдними полюсними накопичувачами.

Для посилення магнітних 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. **Demonstration** and characterization of 130 Gb/in<sup>2</sup> recording systems/[K. Stoev a. o.] // 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> Nx 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.— М.: Радио и связь, 1985.— 208 с.

4. **High** linear density study of advanced single pole head / [K. Stoev a. o.] // Intermag Conf.—Amsterdam, The Netherlands.— Apr./May 2002, paper FB-05.

5. **Recording** layer influence on the dynamics of a soft underlayer / [D. Litvinov, A. Lyberatos, J. Wolfson a. o.] // IEEE Trans. Magn.— Sept. 2002.— Vol. 38.— P. 1994–1996.

6. **Effect** of anisotropy field of soft magnetic underlayer on read / write properties in perpendicular recording media / Y. Nakatani, N. Hayashi, Y. Uesaka, H. Fukushima // Abstr. 47<sup>th</sup> Conf. Magnetism «Magnetic Materials», paper ES-08.

Г. Н. Розоринов, Масуд Махджубиан

#### МАГНИТНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ СВЕРХВЫСОКОПЛОТНОЙ ЗАПИСИ

Исследуются высокомоментные материалы, являющиеся 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. С целью 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.

G. M. Rozorinov, Masoud Mahjoubian

#### A MAGNETIC HEADS FOR SUPER HIGH DENSITY RECORDING

A high-torque materials which are one of possible technological decisions for providing of high-density recording in digital storage devices are researched. 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 coercivity and increase a surface magnetic anisotropy.

**Keywords:** high-torque material; coercivity; magnetic anisotropy; perpendicular record; surface bit density.

УДК 681.35

В. В. КУЗАВКОВ, канд. техн. наук, Є. В. РЕДЗЮК, Л. Т. КОВАЛЬ,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ПРО ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОТИ В РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТАХ

Побудовано математичну модель, що описує процес поширення теплоти в тонкому шарі матеріалу, що покриває кристал напівпровідника. Розглянуто випадок одновимірної нестационарної теплопровідності. Розв'язувати таку задачу доводиться, зокрема, у разі використання методу власного випромінювання для локалізації несправних елементів цифрових блоків за допомогою автономних автоматизованих систем діагностування.

**Ключові слова:** діагностична інформація; метод власного випромінювання; радіоелектронний компонент.

#### Вступ

Теплова енергія, що вивільнилася в деякому пристрої внаслідок дії того чи іншого механізму тепловиділення, надалі переноситься в бік зниження температури. Усе це відбувається згідно із законами теплопередавання, що описуються відомими диференціальними рівняннями.

Розрізняють три способи перенесення теплоти:

- **теплопровідність** — перенесення теплової енергії при безпосередньому контакті тіл або частин одного тіла, що мають різну температуру;
- **конвекція** — перенесення теплоти за рахунок перемішування в просторі рухомих рідин чи газів;