

УДК 681.38

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. В. Осадчук, д. т. н.

РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОЕКТУВАННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

На основі фізичних процесів перетворення енергії у мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачах магнітного поля розроблено показники енергетичної ефективності. В якості оптимальної конструкції рекомендовано біполярну конструкцію з активним індуктивним елементом, яка забезпечує ККД — 75 %, чутливість — $(5 - 8) \cdot 10^3$ Гц/мТ, мультиплікативну похибку — 0,24 %, адитивну — 0,13 %. Узагальнений показник технічного рівня розроблених магнітних радіовимірювальних перетворювачів у 1,68 рази кращий в порівнянні з наявними пристроями.

Вступ

Під час проектування нових радіовимірювальних приладів висуваються все жорсткіші вимоги щодо їх діапазону вимірювання, точності, чутливості, швидкодії, потужності споживання, надійності тощо. Тому для забезпечення цих вимог розробнику радіовимірювальних пристроїв необхідно оцінити їх досконалість і ефективність узагальненими показниками, порівняти їх з подібними показниками раніше розроблених приладів і дати рекомендації з їх проектування. Дана робота присвячена розробці рекомендацій з проектування мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля на основі аналізу функцій перетворення і рівняння чутливості, що визначають основні параметри перетворювачів.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Магніточутливими елементами в радіовимірювальних перетворювачах виступають магніторезистори, сенсори Холла, магнітодіоди, біполярні і польові магнітотранзистори. Проведемо аналіз енергетичної ефективності магніточутливих елементів, оскільки вони визначають ефективність роботи магнітних перетворювачів.

В магніточутливому радіовимірювальному перетворювачі відбувається три етапи перетворення енергії: енергія магнітного поля перетворюється в енергію зміни опору; енергія зміни опору в енергію зміни еквівалентної ємності, а енергія зміни еквівалентної ємності в енергію зміни частоти. Згідно з цими етапами зміни енергії визначимо коефіцієнт корисної дії магніточутливого перетворювача. Першому етапу перетворення енергії відповідає таке значення коефіцієнта корисної дії:

$$\eta_1 = \frac{I^2 R [1 + (\mu_n B)^2] 2t}{\mu \mu_0 H^2 V}, \quad (1)$$

де I — струм через опір, R — величина опору без дії магнітного поля, μ_n — рухливість електронів,

B — магнітна індукція, t — час дії магнітного поля на резистор, μ, μ_0 — відповідно магнітна стала матеріалу опору і вакууму, H — напруженість магнітного поля, V — об'єм резистора.

Аналіз виразу (1) показує, що чим більша величина зміни опору і чим менший об'єм магніторезистора, тим більше значення коефіцієнта корисної дії, тобто, тим краще енергетичний коефіцієнт пристрою. Другому етапу перетворення енергії, який описує зміну енергії опору у зміну енергії ємності, відповідає рівняння

$$\eta_2 = \frac{C_{ekv} U_{\omega}^2}{2t I^2 R [1 + (\mu_n B)^2]}, \quad (2)$$

де C_{ekv} — еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора, U_{ω} — змінна напруга на еквівалентній ємності.

Третій етап перетворення енергії ємності в енергію зміни частоти описується формулою

$$\eta_3 = \frac{i^2}{U_c^2 C_{ekv}^2 4\pi^2 f_0^2}, \quad (3)$$

де i — змінний струм в індуктивному елементі коливального контуру генератора, f_0 — резонансна частота коливального контуру.

Коефіцієнт енергетичної ефективності перетворювача відповідає добутку коефіцієнтів корисної дії кожного з етапів перетворення енергії, тому з врахуванням (1), (2) і (3), можна записати:

$$\eta = \frac{i^2 \mu}{4\pi^2 f_0^2 C_{ekv} B^2 V \mu_0}. \quad (4)$$

Аналіз (4) показує, що чим більший вихідний змінний струм перетворювача, тим більше значення має енергетична ефективність пристрою. Із збільшенням частоти і еквівалентної ємності зменшується коефіцієнт корисної дії, проте це твердження містить в собі суперечність, тому що зі збільшенням еквівалентної ємності зменшується резонансна частота пристрою, тому треба шукати компромісне рішення. Ще одним із висновків, який випливає з аналізу (4), є те, що збільшення об'єму магнітрезистора приводить до зменшення ККД, а збільшення магнітної сталі до його зростання.

Розглянемо який матеріал відповідає вимогам з точки зору оптимальності метрологічних і енергетичних характеристик магнітних перетворювачів. Магнітрезистивний ефект визначається дією сили Лоренца на носії заряду в напівпровідниках. Величина цього ефекту в матеріалі n -типу визначається добутком рухливості електронів і магнітної індукції. Таким чином, висока рухливість електронів є визначальним фактором для отримання високої чутливості. Порівняння значень рухливості ($\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) для різних матеріалів показує, що InSb має коефіцієнт рухливості в об'ємі — 8, InAs — 3, GaAs — 0,5, Si — 0,14 [1]. Напівпровідники n -типу за своїми властивостями краще підходять для магніточутливих елементів ніж напівпровідники p -типу, тому що рухливість дірок майже у 3 рази менша ніж у електронів. Важливе значення для магніточутливих матеріалів має також ширина забороненої зони, тому що вона визначає робочу температуру елемента. Невелике значення забороненої зони в InSb (0,2 eV) і InAs (0,4 eV) обумовлює власний характер провідності при кімнатній температурі, що є недоліком цих матеріалів. З цієї точки зору кращі параметри у Si (1,12 eV) і AsGa (1,42 eV), що дозволяє застосовувати Si до +150 °C, а AsGa до +250 °C. Другою перевагою цих матеріалів є можливість їх інтегрування із схемами обробки сигналів. Для виготовлення таких інтегральних приладів можна використовувати високонадійні стандартні технології, такі як біполярна або КМДН. Створення магніточутливих перетворювачів за рамками стандартних технологій інтегральних схем пов'язано із додатковими витратами на розробку спеціальної технології і оснащення для масового виробництва, а також на відповідні випробовування і засоби забезпечення надійності [1].

Перейдемо до розгляду магніточутливих елементів на основі сенсорів Холла. В перетворювачах, в яких сенсор Холла виступає в якості магніточутливого елемента, відбуваються такі етапи перетворення енергії: перший етап — перетворення енергії магнітного поля в енергію холівської напруги; другий етап — перетворення енергії холівської напруги в енергію еквівалентної ємності; третій етап — перетворення енергії еквівалентної ємності в енергію частотного сигналу. Енергетична ефективність самого сенсора Холла описується рівнянням

$$\eta_x = \frac{I^2 R_H \mu t}{dB \mu_0 V}, \quad (5)$$

де R_H — стала Холла, d — товщина зразка сенсора Холла.

Аналіз (5) показує, що коефіцієнт корисної дії пропорційний квадрату струму, який протікає через зразок сенсора Холла, магнітній сталій матеріалу і часу дії магнітного поля. З другого боку, чим менша товщина зразка, тим більша енергетична ефективність і чим більший об'єм, тим менша величина ККД.

Розглянемо вимоги до сенсорів Холла з точки зору їх проектування. Однією із основних вимог до матеріалу сенсора, окрім високої магніточутливості є його сумісність з Si і GaAs інтегральними схемами. Сенсори на основі Si і GaAs мають малу потужність розсіювання і мале споживання струму, що підвищує їх можливість для інтеграції. Вони також мають технологічну сумісність,

тобто технологія їх виготовлення повністю відповідає технології виготовлення інтегральних схем без використання додаткових операцій.

Шуми в значній мірі впливають на можливість вимірювання корисної інформації сенсорами Холла. Спектральна густина шумової напруги на контактах Холла має вигляд [1]

$$U_{\text{ш}}(f) = U_{\alpha}(f) + U_T,$$

де $U_{\alpha}(f)$ — описує шум типу $1/f$, а U_T — тепловий шум, f — частота.

Величина $U_{\alpha}(f)$ описується рівнянням [2]

$$U_{\alpha}(f) = \alpha(U/l)^2(2\pi n d f)^{-1} \ln(W/S), \quad (6)$$

де α — параметр шуму типу $1/f$ (параметр Худжа) [1], S — розміри омичних контактів Холла.

Спектральна густина теплового шуму визначається [2]

$$U_T = 8kT(\pi\mu_n q n d)^{-1} \ln(W/S). \quad (7)$$

Аналіз (7) показує, що на низьких частотах відношення сигнал-шум буде мати велике значення, якщо матеріал елемента Холла має високу рухливість носіїв заряду і мале значення параметра α , який визначається геометрією зразка, що відповідає $l/W \approx 1,3$. Необхідно також, щоб елемент мав велику кількість носіїв заряду, яка визначається як $N = nd/l$ [1].

Тепловий шум переважає на високих частотах, коли $f \gg f_C$, де f_C — частота сполучення, яка визначається з тотожності $U_{\alpha}(f) = U_T$ і приблизно дорівнює $f_C \sim U^2/T$ або $f_C \sim I^2/T$ [1]. Відношення сигнал-шум зростає із збільшенням струму живлення сенсора і обмежується допустимою потужністю розсіювання P_{max} . Як показали експериментальні дослідження, межа визначення магнітної індукції для Si сенсорів Холла якщо $\mu_n = 6 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $l/W = 2$, $W/S = 4$, $P_{\text{max}} = 0,5 \text{ Вт}$ і $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ за $f \gg f_C$ складає $B_{\text{min}} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ Т}$ [3].

Розглянемо вимоги до конструювання радіовимірювальних магніточутливих перетворювачів, в яких чутливим елементом є магнітотранзистор. Енергетична ефективність таких приладів визначається формулою (5), тому попередні висновки в аналізі цієї залежності справедливі і для магнітотранзисторних перетворювачів. Їх конструкція оптиці зована з точки зору отримання максимальної чутливості колекторного струму від магнітної індукції. Відповідно розроблені конструкції з горизонтальною і вертикальною структурами. Вихідним сигналом є струм колектора $I_K = I_K(B)$ або напруга на опорі навантаження $U_K = U_K(B) = R_K I_K(B)$.

У біполярних магнітотранзисторах існують різні механізми гальваноманітних ефектів, що визначає широкий діапазон чутливості від 10^{-2} Т^{-1} до 4 Т^{-1} . Досконаліше вивчено три механізми дії таких приладів:

а) ефект відхилення неосновних носіїв заряду в базовій області, збідненому шарі переходу база-колектор і в слабологованій області колектора за рахунок дії сили Лоренца;

б) ефект Холла в магнітотранзисторах відноситься до будь-яких впливів, які утворюються холлівським електричним полем, яке виникає за рахунок дії сили Лоренца на основні носії заряду в базовій області;

в) магнітоконцентраційний ефект виникає за рахунок дії сили Лоренца як на основні, так і на неосновні носії заряду, що відбивається у зміні розподілу концентрації носіїв для підтримання електричної нейтральності. Дія будь-якого з розглянутих ефектів залежить в певній мірі від геометрії магнітотранзистора, хоча можуть діяти і одночасно.

Порівняння конструкцій магніточутливих елементів на основі сенсорів Холла і біполярних магнітотранзисторів з точки зору критеріїв якості показало, що чутливість, залишковий струм, лінійність, температурні коефіцієнти чутливості, шумові параметри біполярних магнітотранзисторів мають у середньому такі ж значення як і елементи Холла, крім того, що магнітотранзистори працюють на частотах значно більших, ніж елементи Холла [4, 1].

Перейдемо до розгляду магніточутливих елементів на основі МДН-транзисторів. Магніточутливий елемент являє собою звичайний МДН-транзистор, у якого зроблені додатково дві області холлівських контактів шляхом одночасної дифузії з областями стоку і витоку.

Якщо МДН-транзистор працює в лінійному режимі, коли виконується умова $U_3 - U_{\Pi} \gg U_C$, де U_3 — напруга на затворі, U_{Π} — порогова напруга, U_C — стокова напруга. В цьому випадку густина заряду в каналі $Q_3 = C_{OK}(U_3 - U_{\Pi})$ приблизно має постійне значення уздовж каналу, C_{OK} — ємність підзатворного діелектрика на одиницю площі. За цих умов МДН-сенсор веде себе еквівалентно об'ємному сенсору Холла, причому величина заряду Q_3 еквівалентна поверхневій густині заряду qnd в об'ємному зразку. Відносна чутливість за струмом для МДН-сенсора Холла має вигляд [1]

$$S_{BI} = \frac{R_n G}{C_{OK}(U_3 - U_{\Pi})}, \quad (8)$$

де R_n — коефіцієнт розсіювання, G - коефіцієнт, який характеризує геометрію каналу.

Шляхом вибору параметрів приладу (C_{OK} , U_{Π}) і режиму живлення (U_3) можна досягнути малих значень Q_3 , що приводить до великих значень S_{BI} . Проте лінійний режим роботи відповідає малим струмам і напругам на стоці, що викликає малі напруги Холла. Для покращення параметрів МДН-сенсора потрібно забезпечити режим його роботи в області насичення, при цьому виникає додатковий ефект, коли товщина каналу стає значно меншою, а опір значно більшим біля стоку, ніж біля витоку. Це викликає додаткове зростання напруги Холла за рахунок зростання відношення y/L . З врахуванням цього, напруга Холла матиме вигляд [5]:

$$U_H = \frac{GW\mu_n B I_C}{\beta L [(U_3 - U_{\Pi})^2 - 2yI_C/\beta L]^{1/2}}, \quad (9)$$

де I_C — струм стоку, який визначається

$$I_C = \beta [(U_3 - U_{\Pi}) U_C - U_C^2/2],$$

де $\beta = \mu_n C_{OK} W/L$.

Аналіз (9) показує, що оптимальне співвідношення y_{OPT}/L є таким, коли розташування холлівських контактів вибирається за умовою $0,7 \leq y_{OPT}/L \leq 0,8$ [5].

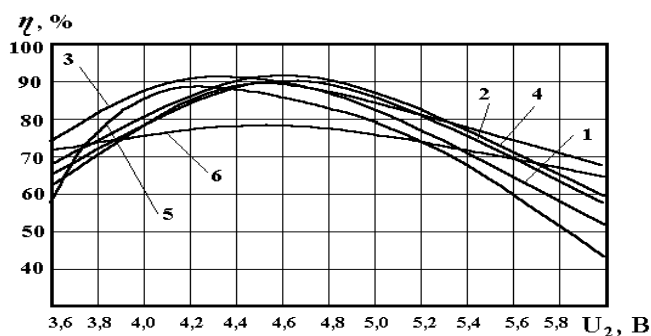


Рис. 1. Залежність коефіцієнта корисної дії від напруги живлення для різних конструкцій магнітних перетворювачів: 1 — з магніторезистором; 2 — з магнітодіодом; 3 — магніточутливий біполярний і МДН транзистори; 4 — 2-МДН транзистори (один з яких магніточутливий); 5 — два польових транзистори з керувальним $p-n$ переходом (один з яких магніточутливий); 6 — біполярна структура з активною індуктивністю

Розглянемо розроблені конструкції радіовимірювальних магніточутливих перетворювачів згідно з енергетичними і метрологічними критеріями. На рис. 1 подана залежність коефіцієнта корисної дії від напруги живлення для різних конструкцій розроблених магнітних перетворювачів. Як видно з графіка, значення ККД для всіх конструкцій майже однакове (~90 %), окрім конструкції перетворювача з активним індуктивним елементом, у якого воно менше на 10 %. Оптимальний режим живлення лежить від 4,2 В до 5,2 В, якому відповідає максимальне значення коефіцієнта корисної дії.

Залежність функції перетворення і чутливості від магнітної індукції показані на рис. 2. Найкращу чутливість має конструкція на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом, хоча чутли-

вість перетворювача залежить від величини магнітної індукції. Останні конструкції, окрім конструкції з магніточутливим резистором, мають приблизно однакову чутливість.

На рис. 3 показані залежності мультиплікативної і адитивної похибок від магнітної індукції для різних конструкцій. Найменшу мультиплікативну похибку мають конструкції з магніточутливим резистором і магнітодіодом, а найбільшу — конструкція з активним індуктивним елементом. Адитивна похибка має найменше значення і залишається незмінною для чотирьох конструкцій, окрім конструкції з магнітодіодом і магніторезистором. Для конструкції з магнітодіодом вона зменшується із зростанням магнітної індукції, а для конструкції з магніторезистором — зростає. Аналіз конструкцій з точки зору розглянутих параметрів показує, що за сукупністю показників кращою є конструкція з активним індуктивним елементом.

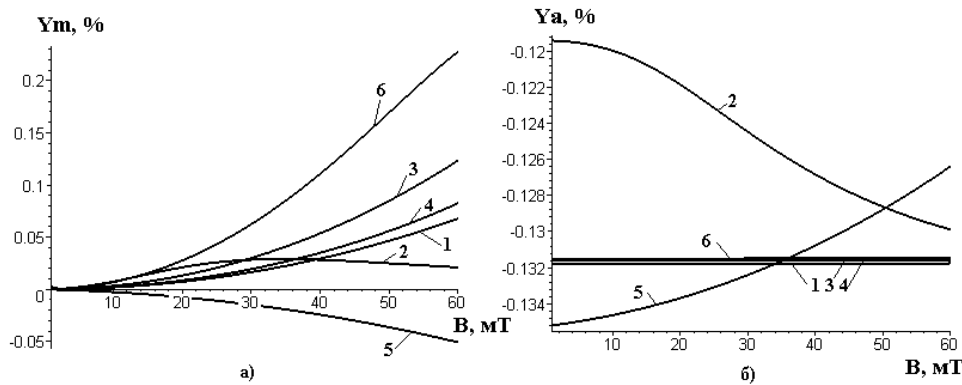


Рис. 3. Залежність мультиплікативної (а) і адитивної (б) похибок від індукції магнітного поля для різних конструкцій магнітних перетворювачів: 1 — з магніторезистором; 2 — з магнітодіодом; 3 — магніточутливий біполярний і МДН транзистори; 4 — 2-МДН транзистори (один з яких магніточутливий); 5 — два польових транзистори з керувальним p - n переходом (один з яких магніточутливий); 6 — біполярна структура з активною індуктивністю

В таблиці 1 подані основні показники наявних і розроблених радіовимірювальних магнітних перетворювачів. Розрахунки узагальненого технічного рівня аналізованих приладів показали, що його значення в 1,68 рази краще у розроблених радіовимірювальних магнітних перетворювачів в порівнянні з наявними.

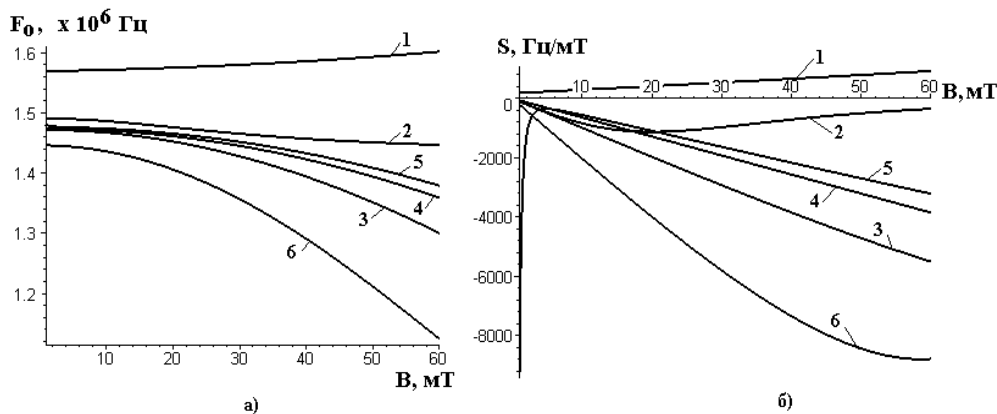


Рис. 2. Залежність функції перетворення (а) і чутливості (б) від індукції магнітного поля для різних конструкцій магнітних перетворювачів: 1 — з магніторезистором; 2 — з магнітодіодом; 3 — магніточутливий біполярний і МДН транзистори; 4 — 2-МДН транзистори (один з яких магніточутливий); 5 — два польових транзистори з керувальним p - n переходом (один з яких магніточутливий); 6 — біполярна структура з активною індуктивністю

Магнітні перетворювачі

№	Показники магнітних перетворювачів	Магніторезистивні перетворювачі	Перетворювачі на ефекті Холла	Магнітододні перетворювачі	Горизонтальні магніто-транзисторні перетворювачі	Вертикальні магніто-транзисторні перетворювачі	Перетворювачі на основі реактивних властивостей	Ідеальні магніточутливі перетворювачі
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	
1	Чутливість, В/Тл	0,1	0,6	14	30	25	102	102
2	Нелінійність, %	1	1	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
3	Температурний коефіцієнт чутливості, К-1	4·10-3	10-3	10-3	6·10-3	4·10-3	10-3	10-3
4	Споживаний струм, мА	2,5	0,5	1	4	10	1	1
5	Рівень вихідного сигналу, В	0,1	0,13	1,5	5	5	5	5
6	Діапазон вимірювання інформативного параметра, Тл	10-5-1	10-5-1	10-9-4	10-5-0,2	10-5-0,05	10-5-1	10-9-4
7	Діапазон робочих частот, Гц	102	0-106	0-108	0-109	0-108	104-1010	0-1010
8	Технологічність	0	0	1	1	1	1	1
9	Температурний діапазон, °С	-65 +150	-40 +125	-60 +125	-60 +125	-60 +125	-100 +125	-65 +150
10	Залишковий сигнал, мВ	20	35	100	200	200	0	0
		M1 = 2,71	M2 = 2,38	M3 = 2,32	M4 = 2,14	M5 = 2,37	M6 = 1,42	

Висновки

На основі фізичних процесів перетворення енергії у мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачах магнітного поля розроблені показники енергетичної ефективності, зростання яких відбувається зі збільшенням вихідного змінного струму, магнітної проникності матеріалу та зменшення об'єму зразка і робочої частоти. Як оптимальна рекомендується біполярна конструкція з активним індуктивним елементом, яка забезпечує ККД — 75 %, чутливість — $(5...8) \cdot 10^3$ Гц/мТ, мультиплікативну похибку — 0,24 %, адитивну — 0,13 %. Узагальнений показник технічного рівня розроблених магнітних радіовимірювальних перетворювачів у 1,68 рази кращий порівняно з відомими пристроями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Балтес Г. П., Попович Р. С. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. — 1986. — Т. 74. № 8. — С. 60—90.
2. Kleinpenning T. G. M., Vandamme I. K. J. Comment on Transverse $1/f$ noise in InSb thin films and the SNR of related Hall elements // J. Appl Phys. — 1979. — Vol. 50. — P. 5547.
3. Kleinpenning T. G. M. Disign of an ac micro-gauss sensor // Sensor and Actuators. — 1983. — Vol. 4. — P. 3—9.
4. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990. — 264 с.
5. Hirata M. Suzuki S. Integrated magnetic sensor. — Tokyo: Inst. Elec. Eng. of Japan. — 1982. — P. 37—40.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (2—5.07.05)

Надійшла до редакції 11.07.05
Рекомендована до друку 21.07.05

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри електроніки; **Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри радіотехніки

Вінницький національний технічний університет